

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MEZIVÝMĚNÍK TEPLA PRIMÁRNÍHO OKRUHU REAKTORU ESFR

THE INTERMEDIATE HEAT EXCHANGER FOR ESFR REACTOR PRIMARY CIRCUIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV ŠVIHEL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. HUGO ŠEN

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Miroslav Švihel

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Mezivýměník tepla primárního okruhu reaktoru ESFR

v anglickém jazyce:

The Intermediate Heat Exchanger for ESFR reactor primary circuit

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jaderný reaktor ESFR VII. rámcového programu EU je rychlý jaderný reaktor, který má být chlazen kapalným sodíkem. Klíčovými komponentami systému odvodu tepla z jaderného reaktoru je mezivýměník tepla sodík/sodík a parní generátor. Mezivýměník tepla je vyhříván kapalným sodíkem, který odnáší teplo z aktivní zóny jaderného reaktoru v primárním okruhu a předává teplo do okruhu sekundárního s parním generátorem. Tvoří tedy hranici mezi radioaktivním a neradioaktivním okruhem. Ačkoliv nehrozí lavinovitá havárie teplosměnné plochy jako u parního generátoru, musí být mezivýměník schopen odvádět spolehlivě teplo ve všech situacích, které mohou při provozu elektrárny nastat. Z pohledu jaderné bezpečnosti je správný návrh tohoto výměníku velmi důležitý.

Cíle diplomové práce:

- 1) Shromáždit dostupné publikované údaje o parametrech ESFR.
- 2) Shromáždit a detailně prostudovat koncepce výměníků tepla na jaderných elektrárnách.
- 3) Navrhnout koncepci mezivýměníku v několika variantách; provést tepelný, hydraulický a pevnostní výpočet pro jednu vybranou variantu.
- 4) Detailně navrhnout vybrané konstrukční části mezivýměníku
- 5) Zpracovat návrhovou výkresovou dokumentaci
- 6) Zhodnotit řešení z pohledu technické a jaderné bezpečnosti

Seznam odborné literatury:

- 1) Kutateladze, S., S., Borišanskij, V., M. Příručka sdílení tepla. Praha: 1962, SNTL.
- 2) Matal, O. Konstrukční cvičení (Vybrané komponenty jaderně energetických zařízení). Brno: 1992, VUT.
- 3) Borišanskij, V., M. Židkometaličeskije teplonositeli. Moskva: 1967, Atomizdat.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Hugo Šen

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 15.11.2011



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

Práce je zaměřena především na návrh mezivýměníku tepla primárního okruhu reaktoru ESFR. Výměník je počítán tepelně, hydraulicky i pevnostně a závěrem je zpracována část výkresové dokumentace. Jsou navrženy základní rozměry trubkového svazku a nádoby výměníku. Je zde obsažen i přehled koncepcí výměníků a doposud použitých typů mezivýměníku na jaderných elektrárnách s rychlými reaktory. Uvedeny jsou zde i základní parametry projektu ESFR a zhodnocena bezpečnost a provozní spolehlivost výměníku.

Abstract

The thesis is mainly focused on the design of the intermediate heat exchanger primary circuit of the reactor ESFR. Heat exchanger is calculated heat, hydraulic and strength and is finally processed part drawings. There are designed the basic dimensions of the tube bundle and container heat exchanger. There are included an overview of concepts and so far used types IHX at the nuclear power plants with fast reactors. There are also mentioned basic parameters of the project ESFR and evaluated the safety and operational reliability of the heat exchanger.

Klíčová slova

Mezivýměník tepla, rychlý reaktor, ESFR, LMFBR, sodík, primární okruh, sekundární okruh, teplosměnná trubka, integrální uspořádání, smyčkové uspořádání, trubkovnice.

Key words

IHX, fast reactor, ESFR, LMFBR, sodium, primary circuit, secondary circuit, heat transfer tube, pool type, loop type, tube sheet

Bibliografická citace

ŠVIHEL, M. *Mezivýměník tepla primárního okruhu reaktoru ESFR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Hugo Šen.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Mezivýměník tepla primárního okruhu reaktoru ESFR vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. května 2012

podpis

.....
Švihel Miroslav

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Hugo Šenovy za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

1 Obsah

1	Obsah	9
2	Úvod	11
3	Reaktory pracující s rychlými neutrony	12
3.1	Rychlý reaktor.....	12
3.2	Chladiva rychlých reaktorů.....	12
3.2.1	Sodík	13
3.3	IV. generace	13
3.4	Reaktory IV. generace	14
3.5	ESFR.....	14
3.5.1	Koncept integrálního uspořádání	16
3.5.2	Koncept smyčkového uspořádání	17
3.6	Bezpečnost, ekonomika, spolehlivost	18
3.7	Porovnání ESFR s LMFBR	20
4	Používané IHX.....	21
4.1	Všeobecné typy	21
4.2	Výměníky v provozu	24
4.2.1	Fermi, Michigan, USA.....	24
4.2.2	BOR-60, Dimitrovgrad, Rusko	26
4.2.3	BN-350, Aktau, Kazachstán.....	29
4.2.4	Phénix, Francie.....	31
4.2.5	BN-600, Beloyarsky-3, Rusko.....	33
4.2.6	Super-Phénix, Francie	36
4.2.7	BN-800, Beloyarsky-4, Rusko.....	38
5	Teoretické základy výpočtu	40
5.1	Tepelný výpočet.....	40
5.1.1	I. zákon termomechaniky	40
5.1.2	Tepelná bilance	41
5.1.3	Teploty.....	41
5.1.4	Měrná tepelná kapacita	42
5.1.5	Hmotností průtok	42
5.1.6	Průtočný průřez	42
5.1.7	Počet trubek	43
5.1.8	Střední rychlost proudění.....	45
5.1.9	Podobnostní čísla	45
5.1.10	Součinitel přestupu tepla.....	46
5.1.11	Logaritmický teplotní spád	47
5.1.12	Prostup tepla	47
5.1.13	Výhřevná plocha	47
5.1.14	Střední délka trubek.....	47
5.2	Hydraulický výpočet.....	48
5.2.1	Tlaková ztráta třením	48
5.2.2	Tlaková ztráta místními odpory	49



5.2.3	Hydrostatický tlak.....	49
5.3	Pevnostní výpočet	50
5.3.1	Válcová část	50
5.3.2	Elipsoidické dno	50
6	Návrhový výpočet.....	52
6.1	Zadané hodnoty.....	52
6.2	Volba konstrukce	52
6.3	Volba materiálu.....	53
6.4	Volba technologie	54
6.5	Volba základních rozměrů	54
6.6	Tepelný výpočet mezivýměníku v 1. přiblížení	54
6.6.1	Předběžný odhad součinitele přestupu tepla.....	54
6.6.2	Předběžný výpočet prostupu tepla	54
6.6.3	Návrh počtu trubek	55
6.7	Volba dalších rozměrů	57
7	Výpočtová část	58
7.1	Tepelný výpočet.....	58
7.1.1	Průtok a rychlost proudění	58
7.1.2	Podobnostní čísla	60
7.1.3	Součinitele a délka trubek.....	62
7.1.4	Další vypočítané rozměry	64
7.2	Hydraulický výpočet.....	64
7.2.1	Tlaková ztráta třením	64
7.2.2	Tlaková ztráta místními odpory	66
7.2.3	Hydrostatický tlak sodíku	68
7.2.4	Celková tlaková ztráta	68
7.3	Pevnostní výpočet	68
7.3.1	Válcová část	68
7.3.2	Elipsoidické dno	69
8	Shrnutí.....	70
8.1	Primární sodík (PS) místo vstupu (1)	70
8.2	Primární sodík místo výstupu (2)	70
8.3	Sekundární sodík (SS) místo vstupu (3)	71
8.4	Sekundární sodík místo výstupu (4).....	71
8.5	Nádoba výměníku a trubkový svazek.....	72
8.6	Jaderná a technická bezpečnost.....	72
8.7	Porovnání s jinými RR	73
9	Závěr.....	74
10	Seznam použité literatury.....	75
11	Seznam použitých zkratk	77
12	Seznam příloh	82

2 Úvod

Zmiňovat se o rostoucí energetické náročnosti společnosti, touze po elektrickém komfortu zemí třetího světa či potřebě stabilního a jistého zdroje této energie není potřeba. Stejně tak jak o tom, že právě jaderná energie může všechny tyto cíle splnit. Budeme-li se dále zabývat především situací v Evropě, najdeme v historii i v současnosti mnoho názorů na jadernou energii s různými odůvodněními daných postojů. Z důvodů pro se dá vybrat ekologičnost a levná výsledná elektřina, proti stojí například vysoké investiční náklady a diskutabilní bezpečnost. Dále se mluví i o omezených zásobách uranu a problému s uložením použitého paliva. Tyto problémy částečně řeší reaktory pracující s rychlými neutrony.

Rychlé reaktory ovšem nejsou otázkou jen nejnovějšího vývoje. V různých typech už jsme se s nimi mohli setkat od 50. let 20. století. Ačkoliv jejich vznik a původní rozvoj nesouvisel úplně s energetickou potřebou společnosti, v nastávajících letech mohou mít obrovský význam v zajištění dodávek elektrické, popřípadě i tepelné energie. Jejich využití bude určitě i v širším rozsahu, a to například pro odsolování mořské vody, na vysokoteplotní technologie, výrobu vodíku a podobně. Pro některé tyto aplikace se již využívaly v minulosti. Jak již bylo zmíněno, v oblasti rychlých reaktorů se stále zkoumají nové možnosti, respektive zdokonalení. Jedním z možných typů v budoucnu stavěných reaktorů se zabývá Evropská unie. Jedná se o tří-okruhový reaktor chlazený sodíkem.

Rychlé evropské reaktory ESFR jsou představiteli reaktorů IV. generace. Jako u všech rychlých reaktorů zde nedochází k moderaci neutronů a ty pak dokážou jak štěpit štěpitelný materiál, tak ho množit. Mohou tedy využívat oproti termálním reaktorům třeba i jádra uranu 238. Teplo z reaktoru je odváděno primární smyčkou do mezivýměníku a dále sekundárním okruhem do parogenerátoru. V obou těchto smyčkách je teplotním médiem sodík a téměř hydrostatický tlak. Ve třetím okruhu už pracuje voda, respektive pára, která pohání turbínu. Na projektu tohoto typu reaktoru se podílí 5 zemí z mezinárodního fóra GIF plus Evropská unie. Mezi členy Evropské unie patří i Česká Republika, nicméně česká vláda nepočítá s výstavbou těchto typů u nás.

Mezivýměník je nezbytnou součástí tohoto typu elektrárny. Umístěný mezi primárním a sekundárním okruhem. V obou smyčkách proudí kapalný sodík nízkého tlaku. Přenáší tepelný výkon z primárního radioaktivního sodíku do sekundárního neradioaktivního a ten pak vytváří páru v parním generátoru. Eliminuje tak možnou kontaminaci páry a zvyšuje celkovou bezpečnost elektrárny.

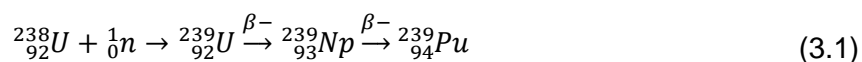
3 Reaktory pracující s rychlými neutrony

Pomineme-li reaktory IV. generace, můžeme je souhrnně nazvat jako reaktory LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactors), tedy rychlé množivé reaktory chlazené kapalným kovem. Kapalným kovem, nejčastěji sodík nebo olovo s bismutem, bylo nutné použít z důvodů jejich větší hustoty a tedy tepelné kapacity, protože u rychlých reaktorů dochází k intenzivnějšímu vývinu tepla.

3.1 Rychlý reaktor

V tepelném reaktoru se pracuje s neutrony o energiích v rozmezí 0,002 eV až 0,5 eV. Pravděpodobnost, že takto pomalý neutron trefí štěpitelné jádro (nejčastěji U235) je vysoká, proto stačí obohacení štěpným materiálem pouze v řádu jednotek procent. Ovšem využití jaderného paliva je také malé. Aby se dala energie v palivu (a to i v dnes označovaném jako vyhořelém) využívat efektivněji, je třeba použít rychlých reaktorů. Protože se zde neutrony nemoderují, pohybují se v energiích řádů až desítek MeV, proto i pravděpodobnost štěpení je výrazně nižší. Je tak třeba mít více štěpných materiálů (U235, Pu239); obohacení se pohybuje okolo 20-50%.

Rychlé neutrony jsou schopny se zachytit i na jádrech uranu 238, který není štěpitelný, a podle rovnice (3.1) pomocí beta rozpadu vznikne štěpitelné plutonium 239. Tato přeměna se děje i v klasickém termálním reaktoru, ale ve velmi malé míře. Produkované plutonium už je štěpitelné. Reaktor může produkovat více štěpitelného materiálu, než sám spotřebuje



Protože dochází k většímu počtu štěpení, dochází i k většímu vývinu tepla. Toto teplo není v dostatečné míře schopna odvádět ani voda ani některé plyny, proto je na chlazení potřeba využít kapalných kovů. Je i důležité, aby chladiivo neutrony nemoderovalo, čemuž také vyhovují kapalně kovy. Tento fakt umožňuje mít oproti energetickým reaktorům menší kompatibilnější provedení pro stejný výkon.

3.2 Chladiiva rychlých reaktorů

Jak již bylo zmíněno na uchlazení rychlých reaktorů, kde je větší vývin tepla než u termálních reaktorů, musí být použita chladiiva, která dokážou teplo odvádět efektivněji. Vyhovují tomu například kapalně kovy, jako je sodík, olovo, olovo-bismut, rtuť, nebo roztavené soli či hélium.

Hélium a roztavené soli jsou uvažovány jako chladiiva pro některé projektované reaktory IV. generace. Nevýhodami rtuti je vysoká toxicita a nízký bod varu (356,6°C) [23]. Olovo má

vysoký bod varu tj. 1740°C [23], ale taky vysoký bod tání 327,5°C [23]. Bod tání snižuje slitina olovo-bismut, ta ovšem působí vůči některým materiálům korozivně.

3.2.1 Sodík

Nejčastěji využívaným chladivem u rychlých reaktorů byl a je sodík. Jeho nízký bod tání a vysoký bod varu nevyžaduje vysoké tlaky v primárním a sekundárním okruhu. Vůči používaným materiálům vykazuje přijatelnou úroveň koroze. Jeho další výhody jsou vysoká tepelná vodivost, dobrá elektrická vodivost, dobrá smáčivost, nízká viskozita a malá toxicita. Je relativně levný a dostupný. Největší nevýhodou je reakce s kyslíkem a vodou. Při kontaktu s vodou bouřlivě reaguje a vzniká hydroxid sodný, vodík a teplo. Díky vzniklému teplu vodík exploduje a hoří. Další možností je slitina sodík-draslík, ta ale působí jako moderátor, proto je používána spíše v sekundárních okruzích.

Tabulka 3.1: Vlastnosti sodíku [23]

	Hodnota	Jednotka
Teplota tání	97,8	°C
Teplota varu	882,9	°C
Protonové číslo	11	
Relativní atomová hmotnost	22,99	

Termofyzikální vlastnosti sodíku použité ve výpočtech byly určovány podle tabulky 3.2, převzaté z literatury [5].

Tabulka 3.2: Termofyzikální vlastnosti sodíku [5]

Teplota [°C]	ρ [kg.m ⁻³]	c_p [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	ν [m ² .s ⁻¹]	Pr [-]
100	928	1,386	86,062	$7,70 \cdot 10^{-7}$	$11,51 \cdot 10^{-3}$
200	903	1,327	81,643	$5,06 \cdot 10^{-7}$	$7,43 \cdot 10^{-3}$
300	878	1,281	75,479	$3,94 \cdot 10^{-7}$	$5,87 \cdot 10^{-3}$
400	854	1,273	68,733	$3,30 \cdot 10^{-7}$	$5,22 \cdot 10^{-3}$
500	829	1,273	63,849	$2,89 \cdot 10^{-7}$	$4,78 \cdot 10^{-3}$
600	805	1,277	60,592	$2,57 \cdot 10^{-7}$	$4,36 \cdot 10^{-3}$

3.3 IV. generace

V roce 1999 bylo ustanoveno mezinárodní fórum, jejímž cílem bylo zabývat se IV. generací reaktorů. Pod názvem GIF (Generation IV International Forum) se seskupilo 9 zemí, které se zabývají jaderným programem, tyto země jsou USA, Argentina, Brazílie, Kanada, Francie, Japonsko, Jižní Afrika, Jižní Korea, Velká Británie, ke kterým se v roce 2002 přidalo Švýcarsko, v roce 2003 Euratom (Evropské společenství pro atomovou energii, které zastupuje 27 členských států EU) a v roce 2006 Rusko a Čína. Z více než 100 návrhů, vybralo více než 100 odborníků z 12 zemí 6 typů reaktorů (v roce 2002). Stanoveny byly individuální plány pro každý typ [14]:

- 1) Fáze životaschopnosti – základní pojmy, palivový cyklus, předběžné analýzy nákladů. Mělo by se tak dít v horizontu 5 -15 let.
- 2) Fáze výkonová (koncepční návrh) – posouzení systému pro veřejnou zakázku, optimalizace materiálových možností, strategie nakládání s odpady. Výhledově 5 -10 let.
- 3) Fáze demonstrační (předběžný návrh) – bezpečnostní prvky, zkoušky, záruka fyzické ochrany, posuzování vlivů. Zde 3 -6 let.

Některé země jsou již ve 2. fázi.

3.4 Reaktory IV. generace

Pro doplnění mezi šest vybraných typů patří [14]:

VHTR (Very-High-Temperature Reactors) – reaktory s velmi vysokou teplotou chlazené plynem (moderované reaktory)

SCWR (SuperCritical Water Reactors) – reaktory chlazené vodou se superkritickými parametry (moderované reaktory)

MSR (Molten Salt Reactors) – reaktory chlazené tavenými solemi (moderované i rychlé reaktory)

GFR (Gas-Cooled Fast Reactors) – plynem chlazené rychlé reaktory

SFR (Sodium-Cooled Fast Reactors) – sodíkem chlazené rychlé reaktory

LFR (Lead-Cooled Fast Reactors) – olovem chlazené rychlé reaktory

V roce 2009 bylo doporučeno, aby sodíkem chlazený systém byl prioritou v oblastech výzkumu a vývoje z důvodu svého potenciálu.

3.5 ESFR

European Sodium-Cooled Fast Reactors – evropské sodíkem chlazené rychlé reaktory. Země, které se podílí na výzkumu tohoto typu: Japonsko, USA, Francie, Korea, Čína, Euratom plus Rusko jako pozorovatel. Především na konferenci FISA 2009 se projednával projekt tohoto reaktoru, ustanovily se zde cíle, kterých se bude dosahovat, a projednaly předběžné parametry zařízení. Projekt je financovaný z 6. rámcového programu EU. Další 7. rámcový program financuje inovované palivo a palivové pokrytí pro systémy IV. generace.

ESFR je jediným z šesti navrhovaných projektů, který může čerpat z širších provozních zkušeností a to ho staví do popředí pro budoucí využití. Je ovšem důležité pro jeho konkurenceschopnost a uplatnění, aby měl lepší vlastnosti a parametry než doposud používané sodíkové reaktory. Například dlouhou životnost, delší intervaly mezi výměnami

paliva a kratší dobu potřebnou pro výměnu paliva. Další vlastnosti projektu jsou snadné ovládání, vysoká tepelná setrvačnost, vysoká tepelná účinnost a lepší bezpečnost. Výhodou je i nižší aktivita vyhořelého paliva a jeho menší objem. Rovněž může disponovat i uzavřeným palivovým cyklem.

Uspořádání elektrárny je tří-okruhové, jak je obvyklé u jaderných elektráren se sodíkem chlazenými rychlými reaktory. První radioaktivní okruh je chlazený radioaktivním sodíkem a obsahuje reaktorovou nádobu, hlavní cirkulační čerpadla, výměník, aktivní zónu, armatury a další. Teplo uvolněné při štěpení se odvádí v šesti smyčkách do mezivýměníku, ten je na rozhraní primárního a sekundárního okruhu. V něm dochází k předání tepla do sekundárního neradioaktivního sodíku. Hranici mezi druhým a třetím okruhem tvoří parní generátor, zde předává teplo sekundární sodík vodě, a tak vytváří páru. Pára v terciárním okruhu pohání turbínu, kondenzuje a proudí zpět do parního generátoru.

Sodíkem chlazený reaktor by se měl vyskytovat ve dvou variantách, a to velké velikosti buď jako smyčkové nebo integrální uspořádání a malé velikosti (modulární reaktor). Palivo má být ve formě oxidické nebo karbidické (tabulka 3.4). Společné základní parametry jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3: ESFR, parametry elektrárny [14]

Reaktor		
	Hodnota	Jednotka
Tepelný výkon reaktoru	3 600	MWt
Elektrický výkon na generátoru	1 500	MWe
Životnost zařízení	60	roky
Tepelná účinnost	42	%
Počet smyček	6	-
Aktivní zóna		
	Hodnota	Jednotka
Teplota na vstupu do aktivní zóny	395	°C
Teplota na výstupu z aktivní zóny	545	°C
Průtok aktivní zónou	19 000	kg.s ⁻¹
Tlaková ztráta v aktivní zóně	0,34	MPa
IHX		
	Hodnota	Jednotka
Výkon	600	MWt
Teplota primárního sodíku	545 až 395	°C
Teplota sekundárního sodíku	340 až 525	°C
Parní generátor		
	Hodnota	Jednotka
Tepelný výkon jednoho modulu	100	MWt
Teplota páry na výstupu	490	°C
Tlak páry	18,5	MPa

Tabulka 3.4: Rozdíl mezi palivem ve formě oxidů a karbidů [14]

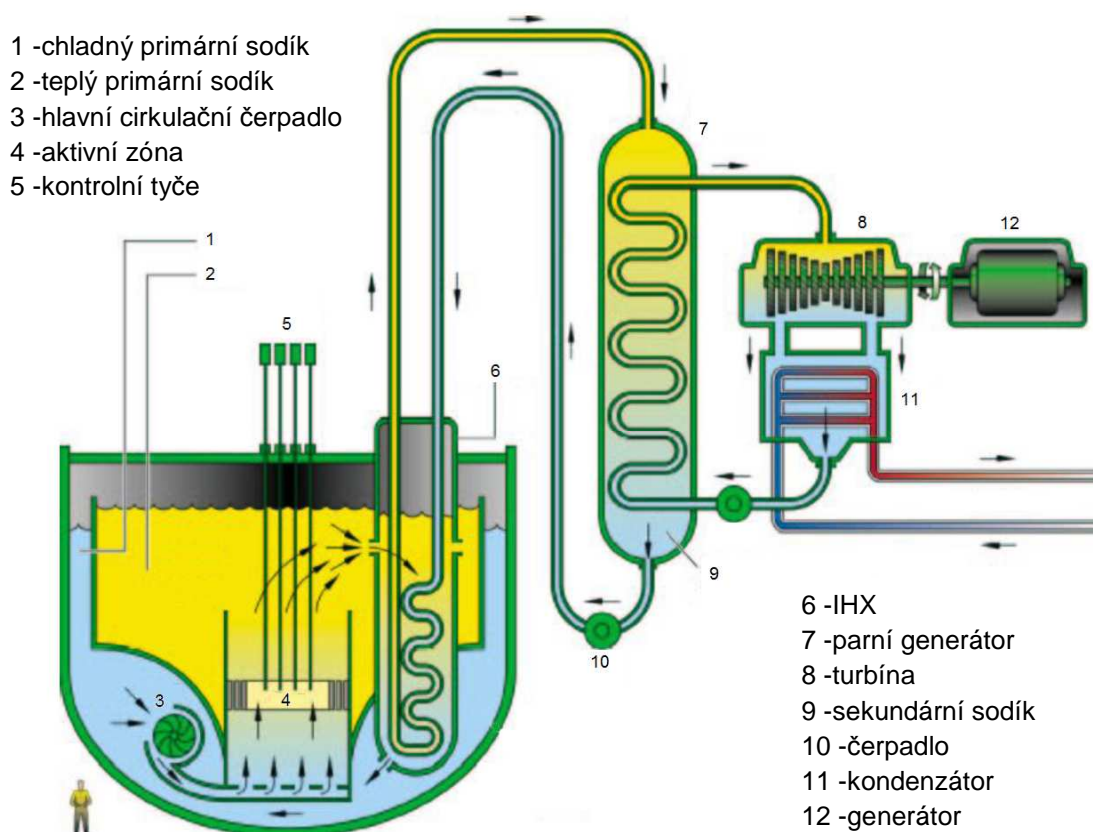
	Palivo oxid	Palivo karbid
Vnitřní palivové tyče (obohacení % Pu)	14,5	14,3
Vnější palivové tyče (obohacení % Pu)	17	19,68
Vnitřní palivové tyče (počet)	225	148
Vnější palivové tyče (počet)	228	246
Havarijní tyče (počet)	9	12
Řídící tyče (počet)	24	24
Délka aktivní zóny (cm)	100	80

Jak již bylo zmíněno, mohou se vyskytnout tři možnosti provedení [14]:

- Velká velikost (smyčkové) – karbidické palivo obohacené na 14% Pu, výkon 600 – 1500 MWe.
- Velká velikost (integrální) – palivo obohacené na 25% Pu a výkon už od 300 do 1500 MWe.
- Malá velikost (modulární reaktor) – palivo ve formě oxidů, výkon pohybující se v rozmezí 100 – 500 MWe.

3.5.1 Koncept integrálního uspořádání

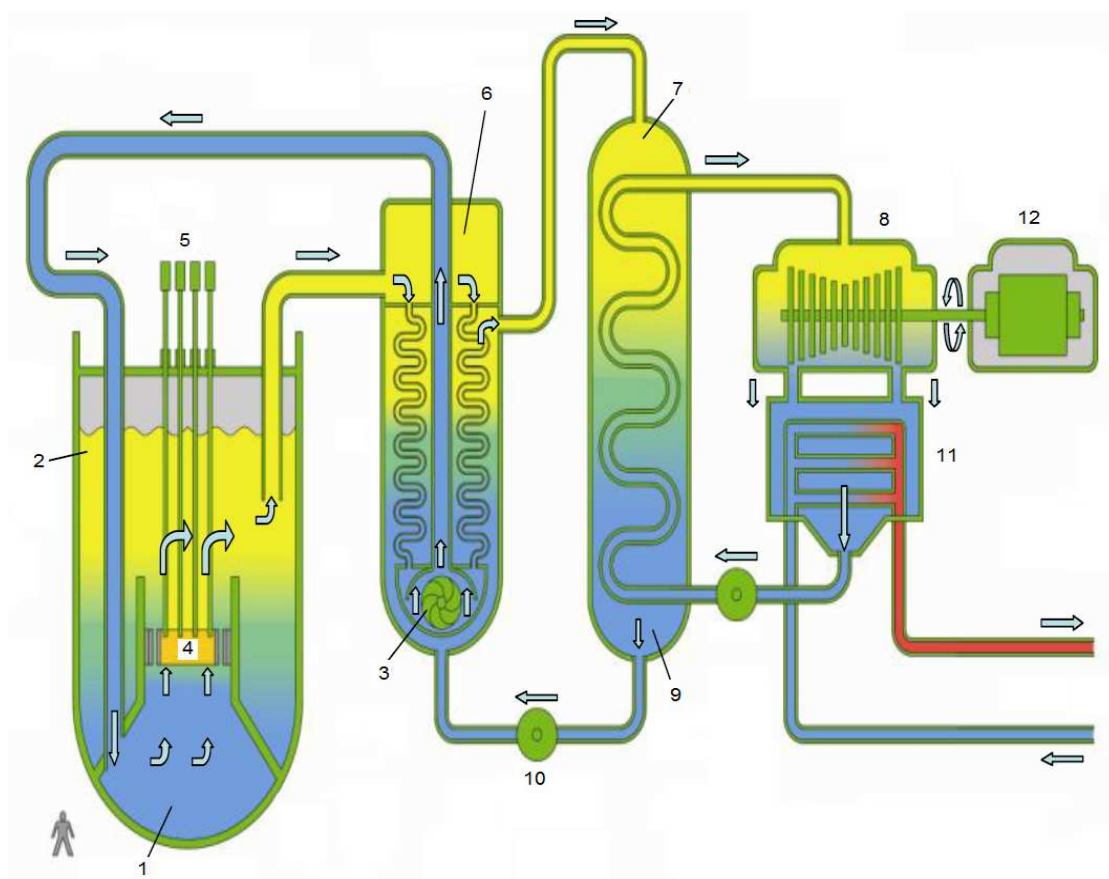
Toto uspořádání se vyskytuje především u novějších reaktorů, a to hlavně v Evropě. Aktivní zóna, mezivýměník i čerpadla jsou zde ponořeny v sodíku v jedné velké nádrži. Provedení je pak kompaktnější, ačkoliv samotná nádoba má velké rozměry. Celý primární okruh a tedy všechny radioaktivní komponenty jsou spolu v uzavřené nádobě, snižuje se tak pravděpodobnost úniku sodíku, a proto je tato varianta bezpečnější. Nevýhodou je horší přístupnost k zařízením jako je například mezivýměník nebo hlavní cirkulační čerpadlo. U výměníku nebudou kladeny z hlediska bezpečnosti nároky na únik sodíku mimo nádobu výměníku, ale únik radioaktivního sodíku do sekundárního okruhu musí být i zde prakticky vyloučen.



Obrázek 3.1: Integrální uspořádání elektrárny [22]

3.5.2 Koncept smyčkového uspořádání

Smyčkové provedení elektrárny bylo využíváno především u prvních rychlých reaktorů. V dnešní době je hlavně u japonských elektráren. Zde je v jedné nádobě pouze aktivní zóna, ponořená do primárního sodíku. Výměník, oběhová čerpadla a další prvky jsou umístěny odděleně. Radioaktivní sodík zde už musí opustit nádobu reaktoru, a proto je toto uspořádání považováno za méně bezpečné, co se týče úniku radioaktivního materiálu do komplexu elektrárny. Výhodou je menší rozměr nádoby reaktoru a lepší přístupnost příslušných komponent. U mezivýměníku se zde musí dbát i na těsnosti vůči úniku sodíku z nádoby ven.



Obrázek 3.2: Smyčkové uspořádání elektrárny [22]

- | | | |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|
| 1 -chlazený primární sodík | 5 -kontrolní tyče | 9 -sekundární sodík |
| 2 -teplý primární sodík | 6 -IHX | 10 -čerpadlo |
| 3 -hlavní cirkulační čerpadlo | 7 -parní generátor | 11 -kondenzátor |
| 4 -aktivní zóna | 8 -turbína | 12 -generátor |

3.6 Bezpečnost, ekonomika, spolehlivost

Požadavky kladené na tyto reaktory ať už ekonomické, bezpečnostní, spolehlivostní nebo další jsou v mnoha oblastech totožné s požadavky na všechny generace. Může se tedy spíše mluvit o oblastech, na které je zaměřen výzkum a bez jejichž vylepšení bude obtížné prorazit.

Vývoj tohoto i ostatních typů IV. generace je neustále monitorován a informace o stavu ať už projektovém nebo ekonomickém jsou do značné míry přístupné. Může se k nim dostat celá širší veřejnost a udělat si představu hlavně o finančních dotacích výzkumu. Je tedy nezbytné, aby tyto reaktory v době svého uvedení na trh měly co nejlepší ekonomické vlastnosti ať už investiční nebo provozní.

U investice je třeba vyvážit dražší zabezpečení, tedy více peněz směřujících do několikanásobného bezpečnostního systému, zohlednit dlouholetý výzkumu, který se na úvodní částce také promítne, hlavně u prvních stavěných typů a nakonec i uzavřený palivový cyklus. Snížit investici je možno standardizovanými modely, stavět elektrárny v sériích. Zkrátila by se tak doba na projektování, schválení a výstavbu. V souvislosti s tím i modulární uspořádání. Co se týče palivového cyklu, je nyní výhodnější otevřený, protože zásoby U235 jsou velké a tedy je levný oproti přepracování paliva. Do budoucna ale se snižujícími se zásoby jeho cena bude stoupat a zároveň vědecký a technologický vývoj sníží cenu recyklace paliva. Pro snížení provozních nákladů se uvažuje zvýšit životnost na 60 let, tento požadavek je hlavně na materiály nevyměnitelných komponent, například reaktorová nádoba. Lepší využitelnost zkrácením odstávek a prodloužením doby mezi nimi.

Výsledkem je vcelku levný provoz, ale velké investiční náklady reaktorů IV. Generace, a proto zatím nemůžou konkurovat plánovaným stavbám generace III.

Kritéria jaderné bezpečnosti musí být na úrovni akceptovatelné příslušnými dozornými orgány a veřejností. Nepřipouští se jakékoliv selhání havarijního systému. Každá menší porucha musí být okamžitě zjistitelná a tím zabráněno možné havárii. V dosavadních zkušenostech s provozem rychlých reaktorů v oblasti bezpečnosti se nevyskytly žádné vážné havárie. Vyskytlé poruchy neměly prakticky žádný vliv na bezpečnost elektrárny a okolí elektrárny.

Strategie bezpečnosti je založena na deterministickém přístupu (systematické vytěšňování iniciačních událostí), popřípadě na deterministicko-pravděpodobnostním přístupu. Konkrétní požadavky jsou, aby havarijní bezpečnostní prvky byly minimálně ztrojnásobené, kde každý musí pracovat samostatně, nezávisle na ostatních a každý sám musí uvést v případě havárie elektrárnu do stabilizovaného stavu. Cílem IV. generace je co nejvíce odstranit technickou potřebu havarijní reakce a lidský faktor. Nahradit aktivní bezpečnostní systém, který je založen na elektrickém a mechanickém aktivním ovládání (sondy, ventily, čerpadla, akumulátory), pasivními systémy. Tyto systémy pracují bez pomoci techniky v závislosti na fyzikálních zákonech (změna hustot, gravitace, stlačený plyn). Je ovšem obtížné hodnotit tyto bezpečnostní systémy, neboť není téměř žádná zpětná vazba.

Nově vznikne problém i se zabezpečením přepracovaného paliva. Pro eliminaci zneužití jaderného materiálu je vhodné mít celý palivový cyklus v areálu elektrárny, případně transportovat v podobě, kdy by byla náročná separace štěpných produktů. Bezpečnost bude záviset i na dokonalosti utěsnění sodíkových okruhů. Měla by být prakticky vyloučena možnost jeho reakce s vodou nebo vzduchem, protože ta by mohla mít destruktivní následky. V tomhle ohledu mají výhodu elektrárny chlazené olovem, které při úniku zatuhne. Částečným řešením je použít v terciárním okruhu místo vody superkritické CO₂, popřípadě helium či dusík.

Je důležité elektrárny stavět tak, aby riziko nehod bylo téměř vyloučeno nebo s minimálními dopady na objekt i okolí elektrárny. Jakákoli nehoda má nepříznivý vliv a dopad na budoucnost jaderné energetiky. Z WANO ukazatele výkonnosti vyplývá, že bezpečnost závisí na průmyslové spolehlivosti.

3.7 Porovnání ESFR s LMFBR

Za jako první rychlý reaktor se dá považovat reaktor Clementine v Los Alamos, USA. V provozu od roku 1946 do 1953. Jako palivo je zde použito Plutonium 239 a tepelný výkon je 0,025 MW_t, dále Phénix (spuštěn 1973), BN-350 (1972) atd.. Do dnešní doby byla provozována celá řada rychlých reaktorů. V následující tabulce bude uvedeno pár vybraných typů.

Tabulka 3.5: Porovnání rychlých reaktorů s ESFR [16]

Reaktor	První kritičnost	Konec provozu	Tepelný výkon [MW _t]	Elektrický výkon [MW _e]
ESFR	projekt	-	3600	1500
BR-10	1959	2003	8	0
Fermi	1963	1975	200	61
BOR-60	1968	v provozu	60	12
BN-350	1972	1999	750	130
Phénix	1973	2009	563	255
BN-600	1980	v provozu	1470	600
Super Phénix	1985	1998	2990	1242
Monju	1994	1995	714	280
BN-800	konstrukce	-	2100	880
PFBR	konstrukce	-	1210	500

Tabulka 3.5: Porovnání rychlých reaktorů s ESFR (pokračování) [16]

Reaktor	Provedení	Počet smyček PO/SO	Teplota chladiva PO [°C]	Teplota chladiva SO [°C]
ESFR	smyčkové i integrální	6/6	545/395	525/340
BR-10	smyčkové	2/2	450/330	370/270
Fermi	smyčkové	3/3	427/288	408/269
BOR-60	smyčkové	2/2	545/330	480/210
BN-350	smyčkové	5/5	430/280	415/260
Phénix	integrální	3/3	560/395	550/343
BN-600	integrální	3/3	535/365	510/315
Super Phénix	integrální	4/4	545/395	525/345
Monju	smyčkové	3/3	529/397	505/325
BN-800	integrální	3/3	547/354	505/309
PFBR	integrální	4/4	530/380	505/350

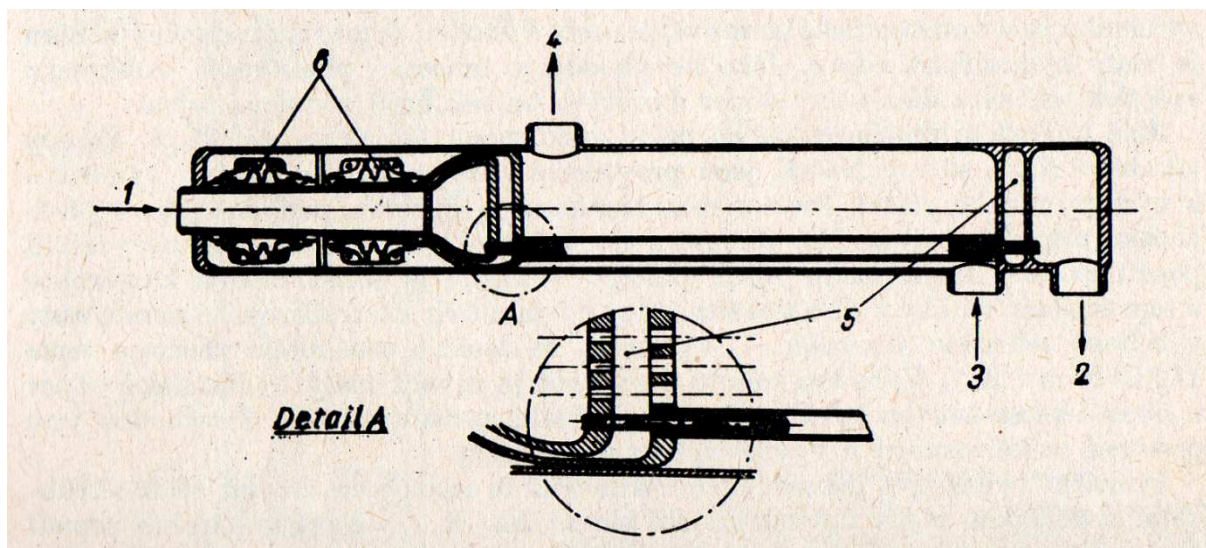
4 Používané IHX

Funkcí mezivýměníku je přenášet tepelný výkon z primárního okruhu do sekundárního, tvoří tak bezpečnostní bariéru mezi radioaktivním sodíkem a neradioaktivním sodíkem. Požadavkem je aby měl výměník co největší výkon na jednotku objemu. Konstrukce musí být kvalitní, závady a netěsnosti jsou za provozu neodstranitelné.

4.1 Všeobecné typy

V následujícím výčtu jsou uvedeny pouze výměníky tepla bez změny fáze obou teplotných látek a výměníky používané pouze pro kapalné kovy jako chladicí média. Jsou tedy pomínuty parogenerátory a zařízení chlazené vodou, plynem, solemi apod.. V kapitole je čerpáno z literatury [2].

Výměníky se mohou rozdělit na výměníky s jednoduchými trubkami a výměníky s dvojitými trubkami. Výměníky s dvojitými trubkami jsou bezpečnější, protože obě proudící média jsou odděleny stojícím vůči nim inertním médiem, ale taky konstrukčně a ekonomicky náročnější. Nevýhodou je i velký odpor proti prostupu tepla. U těchto výměníků (budeme-li brát, že v obou okruzích proudí tekutý sodík popř. slitina sodíku a draslíku) je mezitrubkový prostor vyplněn rovněž sodíkem. Ten má nižší tlak než cirkulující primární sodík a díky tomu je možné měřit únik (zvýšení tlaku v případě poruchy), taky je nepřetržitě měřena radioaktivita.



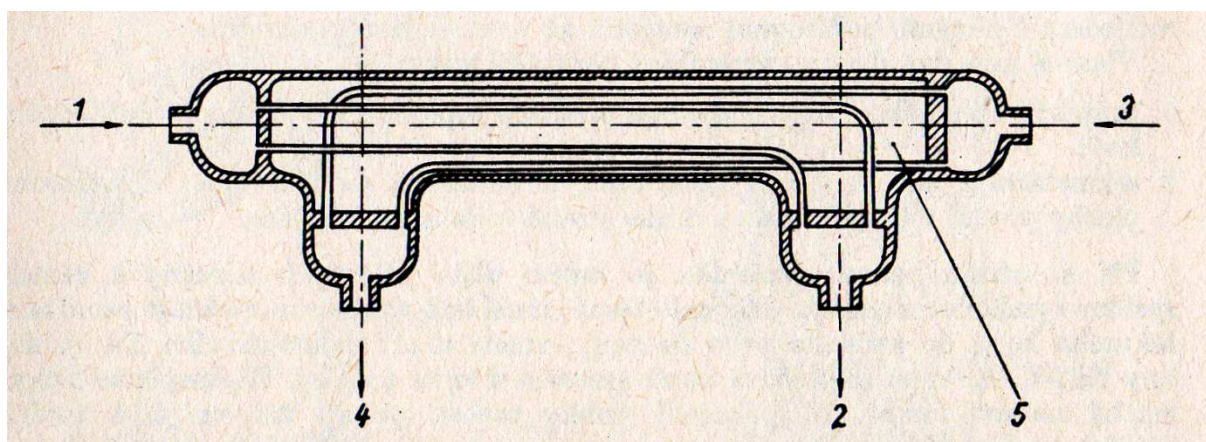
Obrázek 4.1: Primární výměník s dvojitými trubkami [2]

- | | |
|------------------------------|---|
| 1 -vstup primárního sodíku | 4 -výstup sekundárního sodíku |
| 2 -výstup primárního sodíku | 5 -prostor se stojícím sodíkem |
| 3 -vstup sekundárního sodíku | 6 -kompenzace vnitřních a vnějších trubek |

Konkrétní typ výměníku s dvojitými trubkami je na obrázku 4.1. Jsou zde dva druhy trubek menší o vnitřním průměru 12,5 mm a tloušťce stěny 0,85 mm a větší o průměru 16 mm a

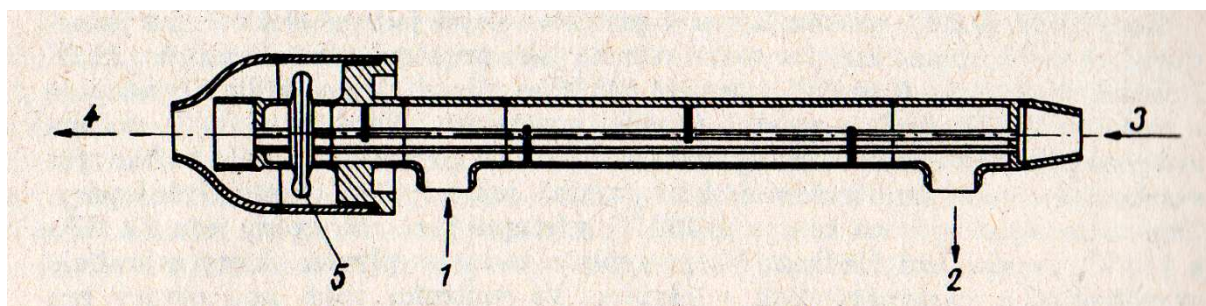
tloušťce stěny 1 mm. Tyto trubky jsou vsunuty do sebe (detail A) a na jedné straně pevně přivařeny ke stěnám, na druhé uchyceny ke kompenzacím. Zařízení obsahuje 72 dvojitéch trubek. Trubkou o menším průměru proudí primární médium, sekundární pak proudí v opačném směru vně větší trubky. Prostor mezi trubkami je vyplněn třetím stojícím médiem. Materiál trubek má složení: 99,4% Ni, 0,1% Cu, 0,15% Fe, 0,2% Mn, 0,05% Si, 0,02% C, materiálem ostatních částí je austenitická nerezová ocel. Je zde ovšem omezená přístupnost trubkovnic, velký odpor proti prostupu tepla, naopak ale malý hydraulický odpor.

V dalším případě je výměník s trubkami ohnutými do L v ohybu zploštěnými (obrázek 4.2). Díky tomuto ohybu zde není třeba kompenzace. Obě média vstupují do výměníku v čelních stěnách a vystupují na boku. Trubky o tloušťce 0,9 mm jsou niklové, konstrukce je celosvařovaná. Výměník je protiproudý a součinitel přestupu tepla dosahuje hodnoty $11\,310\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Je zde i malý hydraulický odpor, nevýhodou jsou větší rozměry a investiční náklady.



Obrázek 4.2: Primární výměník s dvojitými trubkami [2]

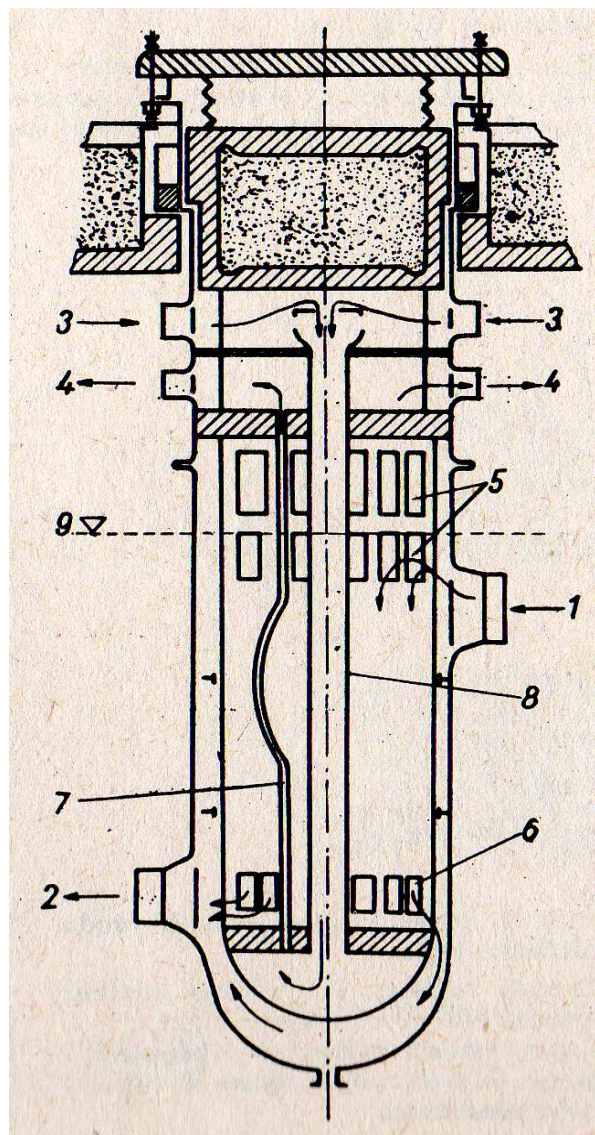
- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| 1 -vstup primárního sodíku | 4 -výstup sekundárního sodíku |
| 2 -výstup primárního sodíku | 5 -prostor se stojícím sodíkem |
| 3 -vstup sekundárního sodíku | |



Obrázek 4.3: Primární výměník s jednoduchými trubkami [2]

- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| 1 -vstup primárního sodíku | 4 -výstup sekundárního sodíku |
| 2 -výstup primárního sodíku | 5 -prostor se stojícím sodíkem |
| 3 -vstup sekundárního sodíku | 6 -kompenzace |

Na obrázku 4.3 je protiproudý primární výměník s jednoduchými trubkami. Jejich tloušťka je 0,6 mm a primární sodík proudí vně trubek, sekundární uvnitř. Kvůli tepelné roztažnosti jsou trubky na jedné straně přichyceny ke kompenzaci a na druhé přivařeny k pevné trubkovnici. Oproti dvojitým trubkám je zde vyšší součinitel přestupu tepla a investiční náklady zhruba poloviční.



Obrázek 4.4: Primární výměník s jednoduchými
trubkami [2]

Obrázek 4.4 znázorňuje jiný typ konstrukce výměníku. Centrálním otvorem je přiveden sekundární sodík, který se dostává do spodní části výměníku a odtud proudí trubkami zpět do vrchní části. Trubkovnice ve spodní části je plovoucí, tím eliminuje tepelnou roztažnost. Primární sodík vstupuje do mezitrubkového prostoru obvodově uspořádanými obdélníkovými otvory v horní části. Vystupuje podobným způsobem ve spodní části výměníku.

- 1 -vstup primárního sodíku
- 2 -výstup primárního sodíku
- 3 -vstup sekundárního sodíku
- 4 -výstup sekundárního sodíku
- 5 -vstup sodíku do mezitrubkového prostoru
- 6 -výstup sodíku z mezitrubkového prostoru
- 7 -teplosměnná trubka
- 8 -centrální trubka
- 9 -hladina sodíku za provozu

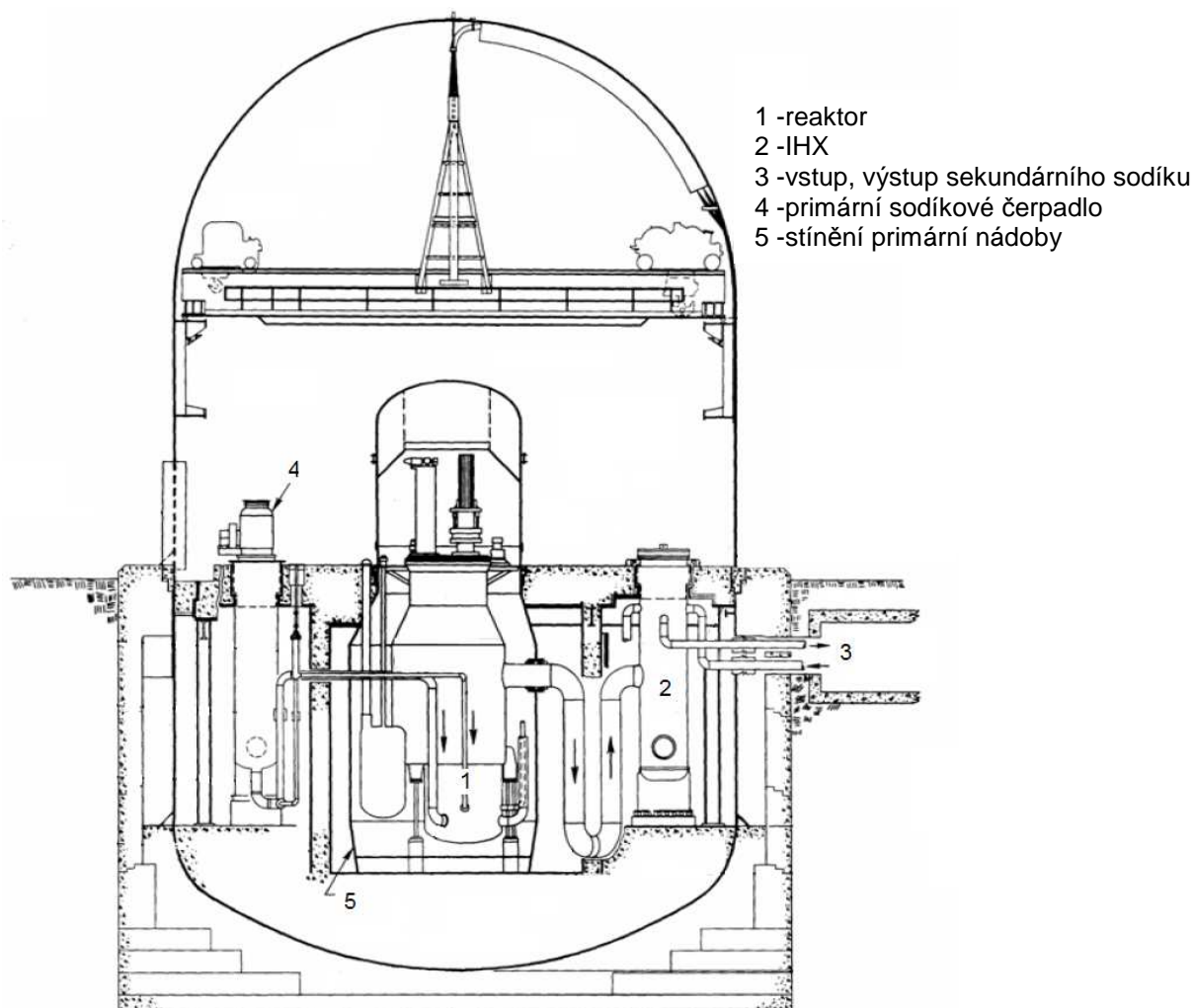
4.2 Výměníky v provozu

V oblasti sodíkem chlazených rychlých reaktorů jsou již nasbírány značné zkušenosti a to se promítá i do konstrukcí výměníků. Ověřilo se, že i když má mezivýměník velký vliv na bezpečnost a velké požadavky na zabezpečení úniku média, stačí používat pouze jednoduché trubky. Důvodem je lepší přestup tepla, méně komplikovaná konstrukce a díky tomu celkově levnější.

Tato část je zaměřena na konkrétní typy v minulosti již použitých výměníků. Jsou zde uvedeny pouze vybrané typy. Většina těchto výměníků má podobné konstrukce.

4.2.1 Fermi, Michigan, USA

EFFBR (Enrico Fermi Fast Breeder Reactor), Enrico Fermi rychlý množivý reaktor byl navržen, postaven a provozován pro hodnocení ekonomiky provozu. Vyřazen z provozu byl z důvodů nedostatku finančních prostředků.



Obrázek 4.5: Fermi-1, reaktorová budova [18]

Tabulka 4.1: Fermi-1, parametry elektrárny [16]

	Hodnota	Jednotka
Uspořádání	smyčkové	
První kritičnost	1963	rok
Odstavení	1975	rok
Tepelný výkon	200	MW _t
Elektrický výkon	61	MW _e
Počet smyček PO/SO	3/3	
Chladiiva PO-SO	Na-Na	
Průtok chladiiva PO (jedna smyčka)	1185 (395)	kg.s ⁻¹
Průtok chladiiva SO (jedna smyčka)	1200 (400)	kg.s ⁻¹

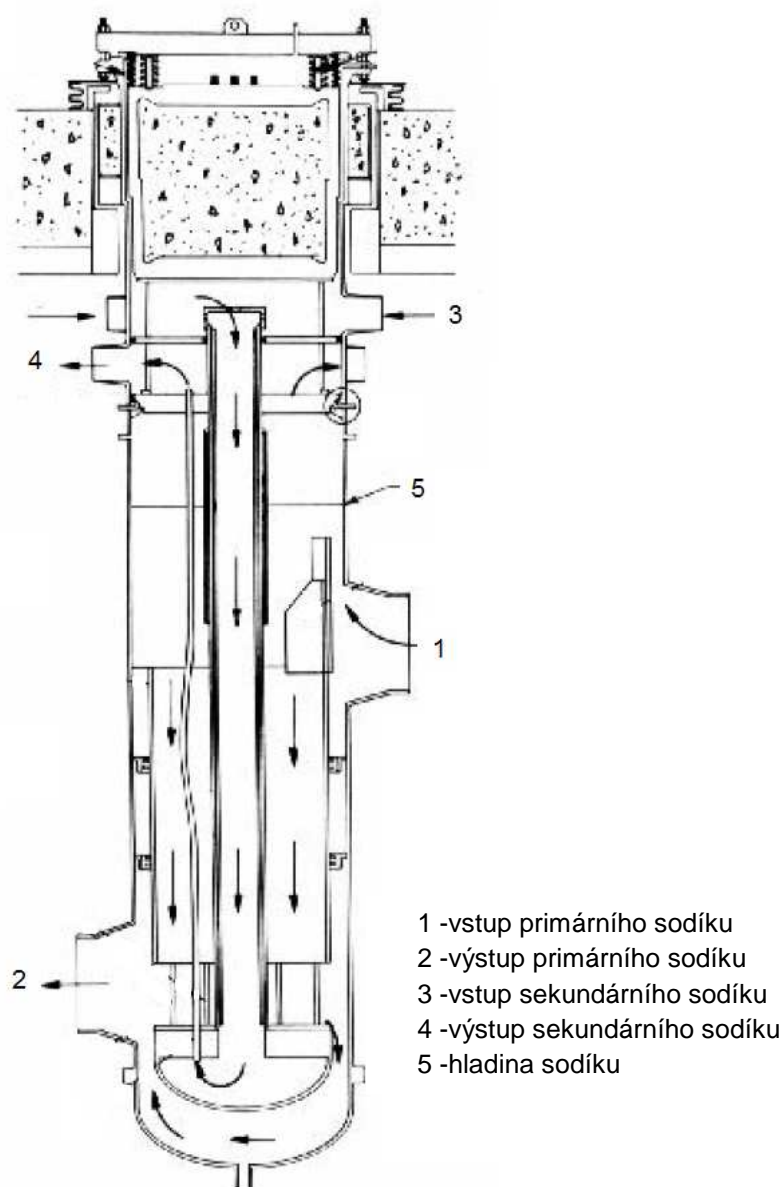
Tabulka 4.2: Fermi-1, parametry elektrárny [16]

	Horká větev	Chladná větev	Jednotka
Teplota chladiiva v PO	427	288	°C
Teplota chladiiva v SO	408	269	°C
Trubky PO vnější průměr/tloušťka	760/9,5	760/9,5	mm
Trubky SO vnější průměr/tloušťka	305/9,5	305/9,5	mm
Materiál trubek PO	304	304	
Materiál trubek SO	2 ¼ Cr-1 Mo	2 ¼ Cr-1 Mo	

Tabulka 4.3: Fermi-1, parametry IHX [16]

	Hodnota	Jednotka
Počet jednotek pro primární smyčku	1	
Počet trubek	1860	
Nádoba vnější průměr/tloušťka	1450/-	mm
Trubky vnější průměr/tloušťka	22,2/1,24	mm
Délka trubek	4660	mm
Materiál nádoby	304	
Materiál trubek	304	

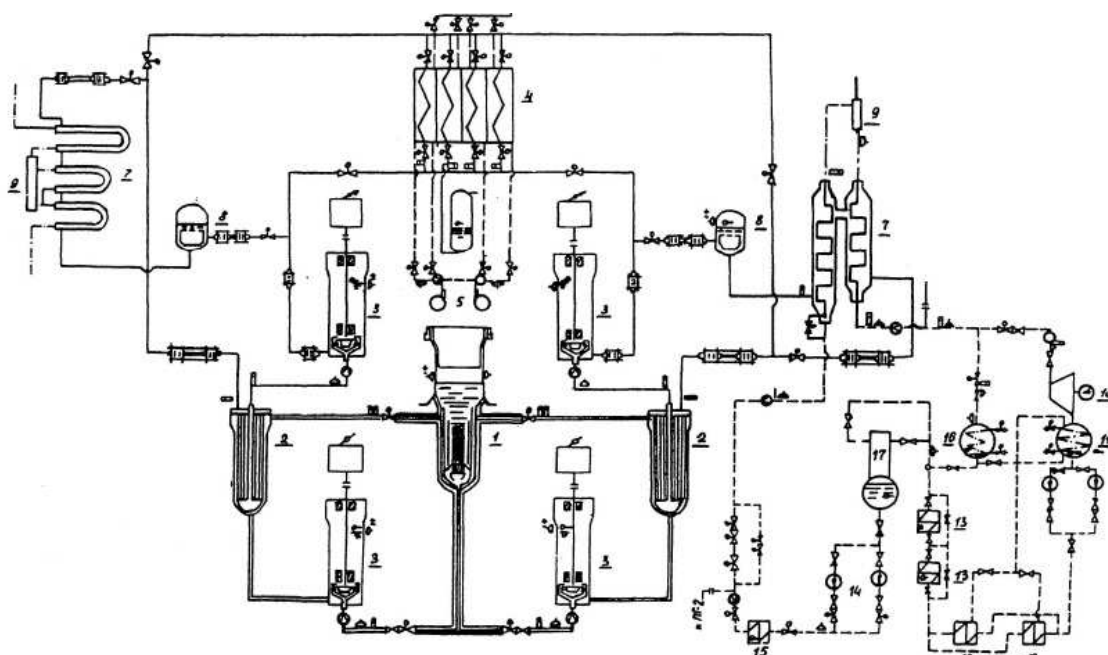
Celkový tepelný výkon 200 MW_t byl z reaktoru odváděn třemi smyčkami, tedy tři výměníky každý 66,5 MW_t. Uspořádání elektrárny je smyčkové a výměník vertikálního typu. Průměr trubek 22,2 mm a jejich délka 4,66 m. V primárním i sekundárním okruhu je chladicí médium sodík. Primární sodík vstupuje otvorem v horní části výměníku, kde po obvodě vstupuje do mezitrubkového prostoru. Vystupuje otvorem ve spodní části výměníku. Sekundární sodík proudí centrální trubkou do spodní trubkovnice, tam se otáčí o 180° a v trubkách proudí zpět do horní části, kde z výměníku na stranách vystupuje. Trubkovnice v horní části je připevněna na pevně, ve spodní části je volně plovoucí z důvodů tepelné dilatace.



Obrázek 4.6: Fermi-1, IHX [18]

4.2.2 BOR-60, Dimitrovgrad, Rusko

Bystrij Opytnyj Reactor (Rychlí experimentální reaktor) neboli BOR. Jeho cílem bylo provést široký rozsah testování paliv a konstrukčních materiálů pro velké vyhoření paliva. Rovněž testoval technologie LMFBR, jako jsou parní generátory nebo sodíkové čerpadla.



Obrázek 4.7: BOR-60, schéma elektrárny [18]

- | | | |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------|
| 1 - reaktor | 6 - expanzní nádoba | 12 - ohříváč |
| 2 - IHX | 7 - parní generátor | 13 - nízkotlaké topné těleso |
| 3 - čerpadlo | 8 - expanzní nádoba PG | 14 - čerpadlo |
| 4 - výměník sodík vzduch | 9 - separátor | 15 - vysokotlaké topné těleso |
| 5 - ventilátor | 10 - turbína | 16 - kondenzátor |
| | 11 - kondenzátor | 17 - odplyňovač |

Tabulka 4.4: BOR-60, parametry elektrárny [16]

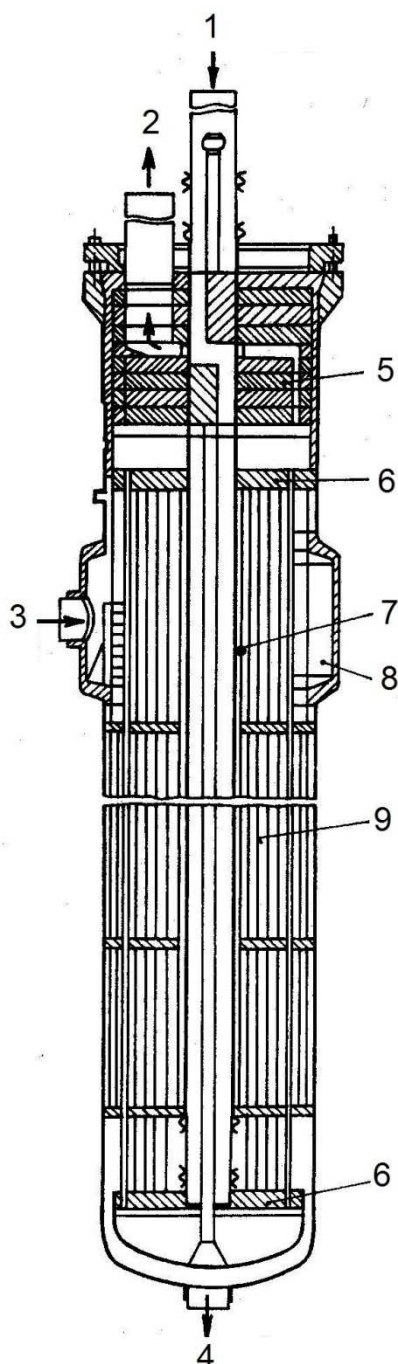
	Hodnota	Jednotka
Uspořádání	smyčkové	
První kritičnost	1968	rok
Odstavení	v provozu	
Tepelný výkon	60	MW _t
Elektrický výkon	12	MW _e
Počet smyček PO/SO	2/2	
Chladiva PO-SO	Na-Na	
Průtok chladiva PO (jedna smyčka)	270 (135)	kg.s ⁻¹
Průtok chladiva SO (jedna smyčka)	220 (110)	kg.s ⁻¹

Tabulka 4.5: BOR-60, parametry elektrárny [16]

	Horká větev	Chladná větev	Jednotka
Teplota chladiva v PO	545	330	°C
Teplota chladiva v SO	480	210	°C
Trubky PO vnější průměr/tloušťka	300/12	200/8	mm
Trubky SO vnější průměr/tloušťka	200/8	200/8	mm
Materiál trubek PO	1 Cr18Ni9	Cr18Ni9	
Materiál trubek SO	Cr18Ni9	Cr18Ni9	

Tabulka 4.6: BOR-60, parametry IHX [16]

	Hodnota	Jednotka
Počet jednotek pro primární smyčku	1	
Počet trubek	1158	
Nádoba vnější průměr/tloušťka	1200/20	mm
Trubky vnější průměr/tloušťka	20/2	mm
Délka trubek	3000	mm
Materiál nádoby	Cr18Ni9	
Materiál trubek	Cr18Ni9	



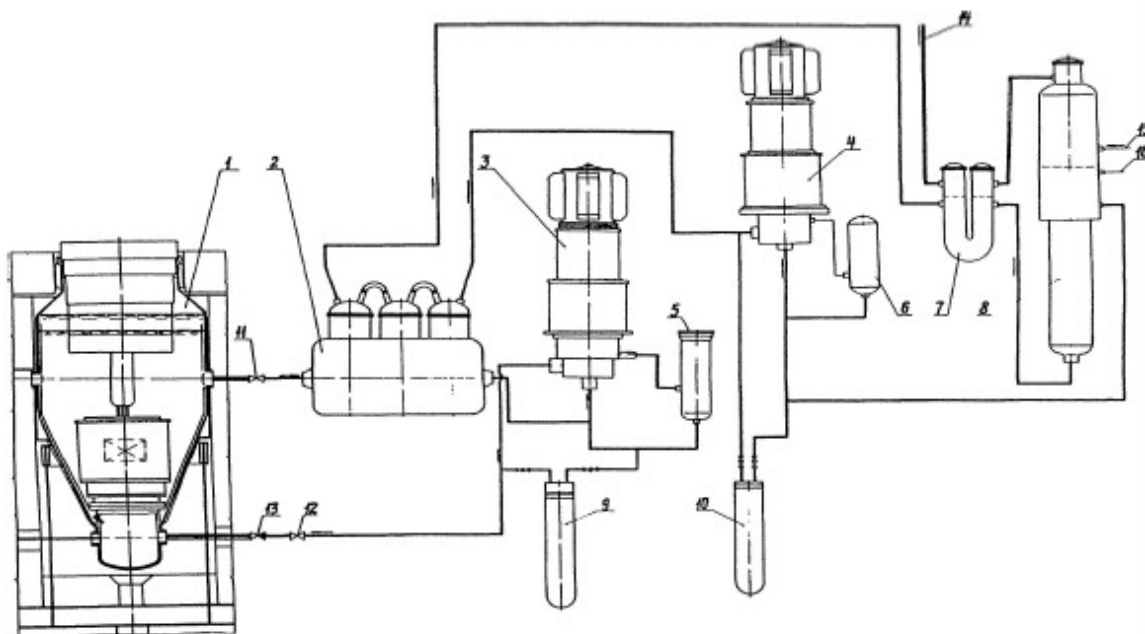
Podobně i výměník reaktoru BOR. Teplený výkon výměníku je 30 MWt a jsou na elektrárně dva. Chladicí médium je sodík. Provedení elektrárny je smyčkové. Zde vstupuje primární sodík do mezitrubkového prostoru po obvodě v horní části a vystupuje v nejspodnějším místě dnem výměníku. Sekundární sodík proudí přes centrální trubku do spodní plovoucí trubkovnice a zpět trubkami.

Obrázek 4.8: BOR-60, IHX [18]

- 1 -vstup sekundárního sodíku
- 2 -výstup sekundárního sodíku
- 3 -vstup primárního sodíku
- 4 -výstup primárního sodíku
- 5 -biologické stínění
- 6 -trubkovnice
- 7 -centrální trubka
- 8 -vstupní komora
- 9 -svazek trubek

4.2.3 BN-350, Aktau, Kazachstán

První reaktor z řady BN (bystryj natrievyj) rychlý sodíkem chlazený. Demonstrační reaktor sloužící k odsolování mořské vody. Produkoval 100 000 tun destilované vody za den.



Obrázek 4.9: BN-350, schéma elektrárny [18]

- | | | |
|---------------------------------|---------------|------------------------------|
| 1 - reaktor | 6 - čerpadlo | 11 -ND 600 šoupátko |
| 2 -IHX | 7 -přehřívák | 12 -ND 500 šoupátko |
| 3 -primární oběhové čerpadlo | 8 -výparník | 13 -zpětný ventil |
| 4 - sekundární oběhové čerpadlo | 9 -odlučovač | 14 -hlavní parní potrubí |
| 5 -čerpadlo | 10 -odlučovač | 15 -napájecí voda |
| | | 16 -vedení plynového systému |

Tabulka 4.7: BN-350, parametry elektrárny [16]

	Hodnota	Jednotka
Uspořádání	smyčkové	
První kritičnost	1972	rok
Odstavení	1999	rok
Tepelný výkon	750	MW _t
Elektrický výkon	130	MW _e
Počet smyček PO/SO	5/5 (6/6)*	
Chladiva PO-SO	Na-Na	
Průtok chladiva PO (jedna smyčka)	3950 (790)	kg.s ⁻¹
Průtok chladiva SO (jedna smyčka)	4400 (880)	kg.s ⁻¹

*-jedna smyčka rezervní

Tabulka 4.8: BN-350, parametry elektrárny [16]

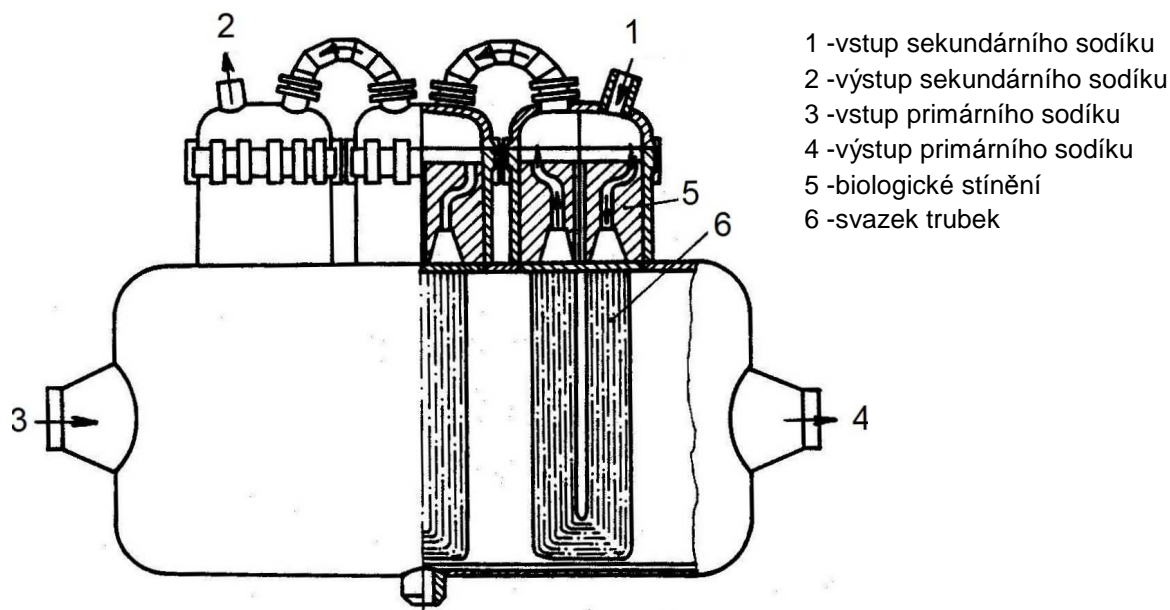
	Horká větev	Chladná větev	Jednotka
Teplota chladiva v PO	430	280	°C
Teplota chladiva v SO	415	260	°C
Trubky PO vnější průměr/tloušťka	630/12	630/13	mm
Trubky SO vnější průměr/tloušťka	529/12	529/12	mm
Materiál trubek PO	Cr18Ni9	Cr18Ni9	
Materiál trubek SO	Cr18Ni9	Cr18Ni9	

Tabulka 4.9: BN-350, parametry IHX [16]

	Hodnota	Jednotka
Počet jednotek pro primární smyčku	2	
Počet trubek	1029	
Nádoba vnější průměr/tloušťka	200x3000**/24	mm
Trubky vnější průměr/tloušťka	28/2	mm
Délka trubek	7000	mm
Materiál nádoby	Cr18Ni19Ti	
Materiál trubek	Cr18Ni19Ti	

**-obdélníkový průřez

Výměník této elektrárny je v porovnání s ostatními typy výjimkou. Uspořádání elektrárny je smyčkové. Primární sodík vstupuje na straně výměníku a proudí horizontálně v mezitrubkovém prostoru, kolmo na trubky. Vystupuje na druhé straně výměníku. V trubkách proudí sekundární sodík, ten vstupuje i vystupuje v horní části. Trubky jsou zahnuty to tvaru U. Celý výměník je složen z jednotlivých článků. V jednom výměníku jsou tři články vzájemně na sebe sériově napojeny.



Obrázek 4.10: BN-350, IHX [18]

4.2.4 Phénix, Francie

Jeden z prvních sodíkových reaktorů pracujících pro širší energetické využití. Od roku 1993 fungoval navíc jako podpora CEA pro výzkum a vývoj dlouhodobého nakládání s odpady.

Tabulka 4.10: Phénix, parametry elektrárny [16]

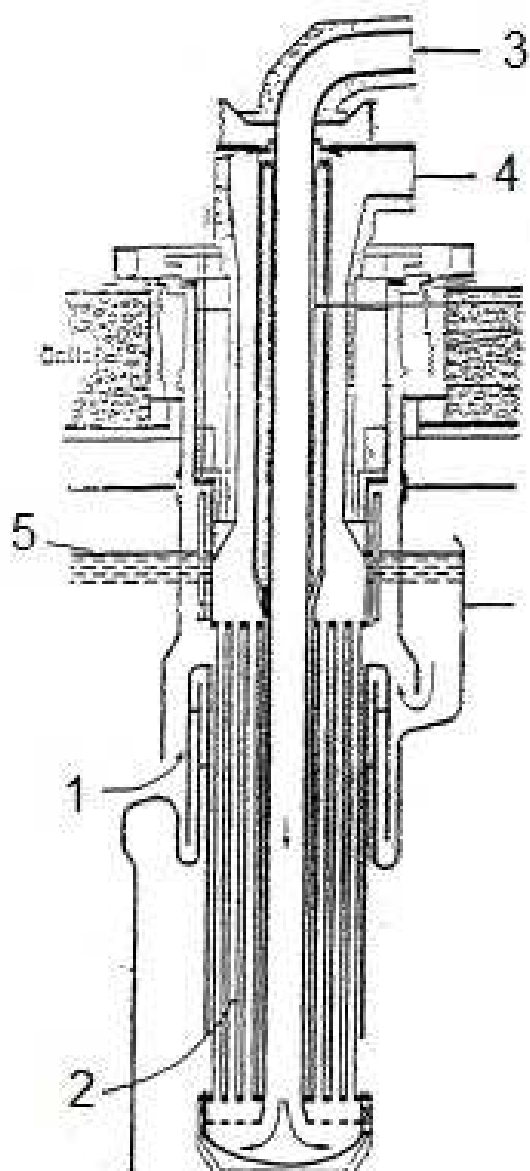
	Hodnota	Jednotka
Uspořádání	integrální	
První kritičnost	1973	rok
Odstavení	2009	rok
Tepelný výkon	563	MW _t
Elektrický výkon	255	MW _e
Počet smyček PO/SO	3/3	
Chladiva PO-SO	Na-Na	
Průtok chladiva PO (jedna smyčka)	3000 (1000)	kg.s ⁻¹
Průtok chladiva SO (jedna smyčka)	2319 (773)	kg.s ⁻¹

Tabulka 4.11: Phénix, parametry elektrárny [16]

	Horká větev	Chladná větev	Jednotka
Teplota chladiva v PO	560	395	°C
Teplota chladiva v SO	550	343	°C
Trubky PO vnější průměr/tloušťka	-	-	mm
Trubky SO vnější průměr/tloušťka	510/6	510/7	mm
Materiál trubek PO	316	316	
Materiál trubek SO	321	304	

Tabulka 4.12: Phénix, parametry IHX [16]

	Hodnota	Jednotka
Počet jednotek pro primární smyčku	2	
Počet trubek	2279	
Nádoba vnější průměr/tloušťka	1210/-	mm
Trubky vnější průměr/tloušťka	14/1	mm
Délka trubek	5300	mm
Materiál nádoby	316	
Materiál trubek	316	



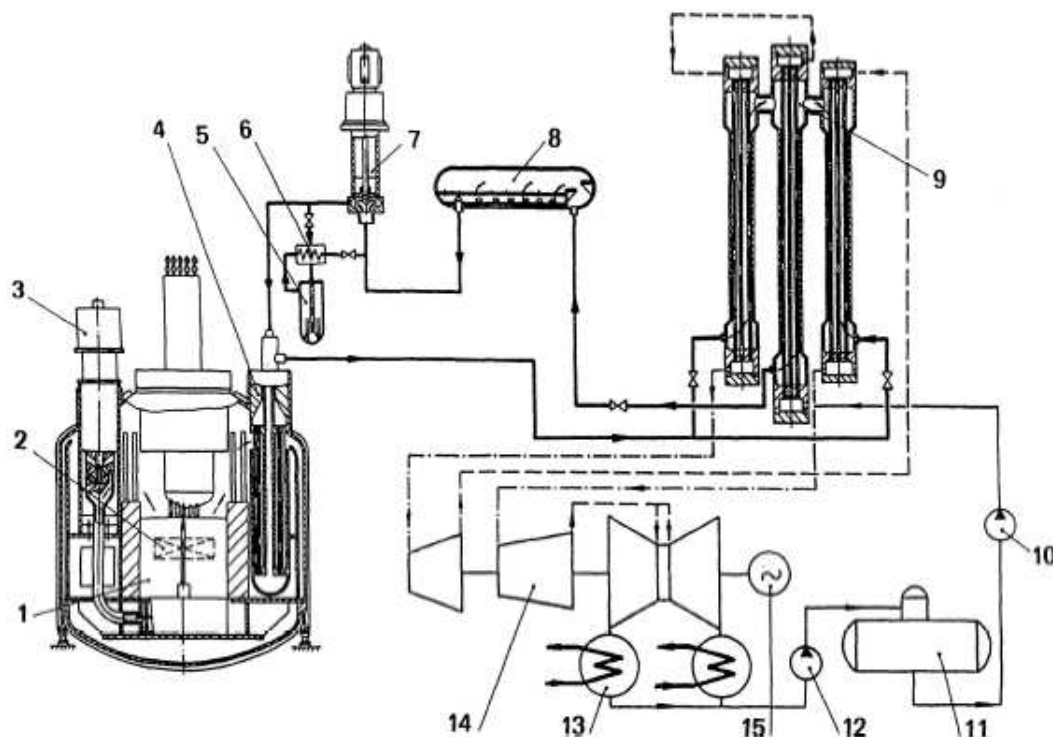
Výměník této elektrárny je v integrálním uspořádání. Chladivem primární i sekundární smyčky je sodík. Princip výměníku je zřejmý z obrázku 4.11. Sekundární sodík proudí z vrchní části výměníku do spodní a v opačném směru v teplosměnných trubkách. Primární sodík vstupuje do mezitrubkového prostoru bočními otvory v horní části a podobně vystupuje ve spodní části. Rozdíl je v tom, že zde není třeba dbát na těsnost výměníkové nádoby.

Obrázek 4.11: Phénix, IHX [18]

- 1 -vstup primárního sodíku
- 2 -výstup primárního sodíku
- 3 -vstup sekundárního sodíku
- 4 -výstup sekundárního sodíku
- 5 -hladina sodíku

4.2.5 BN-600, Beloyarsky-3, Rusko

Rychlí množivý reaktor v pořadí třetí v Beloyarské jaderné elektrárně.



Obrázek 4.12: BN-600, schéma elektrárny [18]

- | | | |
|------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 1 -reaktor | 6 -rekuperátor | 11 -odplyňovač |
| 2 -aktivní zóna | 7 -sekundární oběhové čerpadlo | 12 -čerpadlo kondenzátu |
| 3 -primární oběhové čerpadlo | 8 -expanzní nádoba sodíku | 13 -kondenzátor |
| 4 -IHX | 9 -parní generátor | 14 -turbína |
| 5 -filtr | 10 -čerpadlo napájecí vody | 15 -turbogenerátor |

Tabulka 4.13: BN-600, parametry elektrárny [16]

	Hodnota	Jednotka
Uspořádání	integrální	
První kritičnost	1980	rok
Odstavení	v provozu	
Tepelný výkon	1470	MW _t
Elektrický výkon	600	MW _e
Počet smyček PO/SO	3/3	
Chladiva PO-SO	Na-Na	
Průtok chladiva PO (jedna smyčka)	6600 (2200)	kg.s ⁻¹
Průtok chladiva SO (jedna smyčka)	6090 (2030)	kg.s ⁻¹

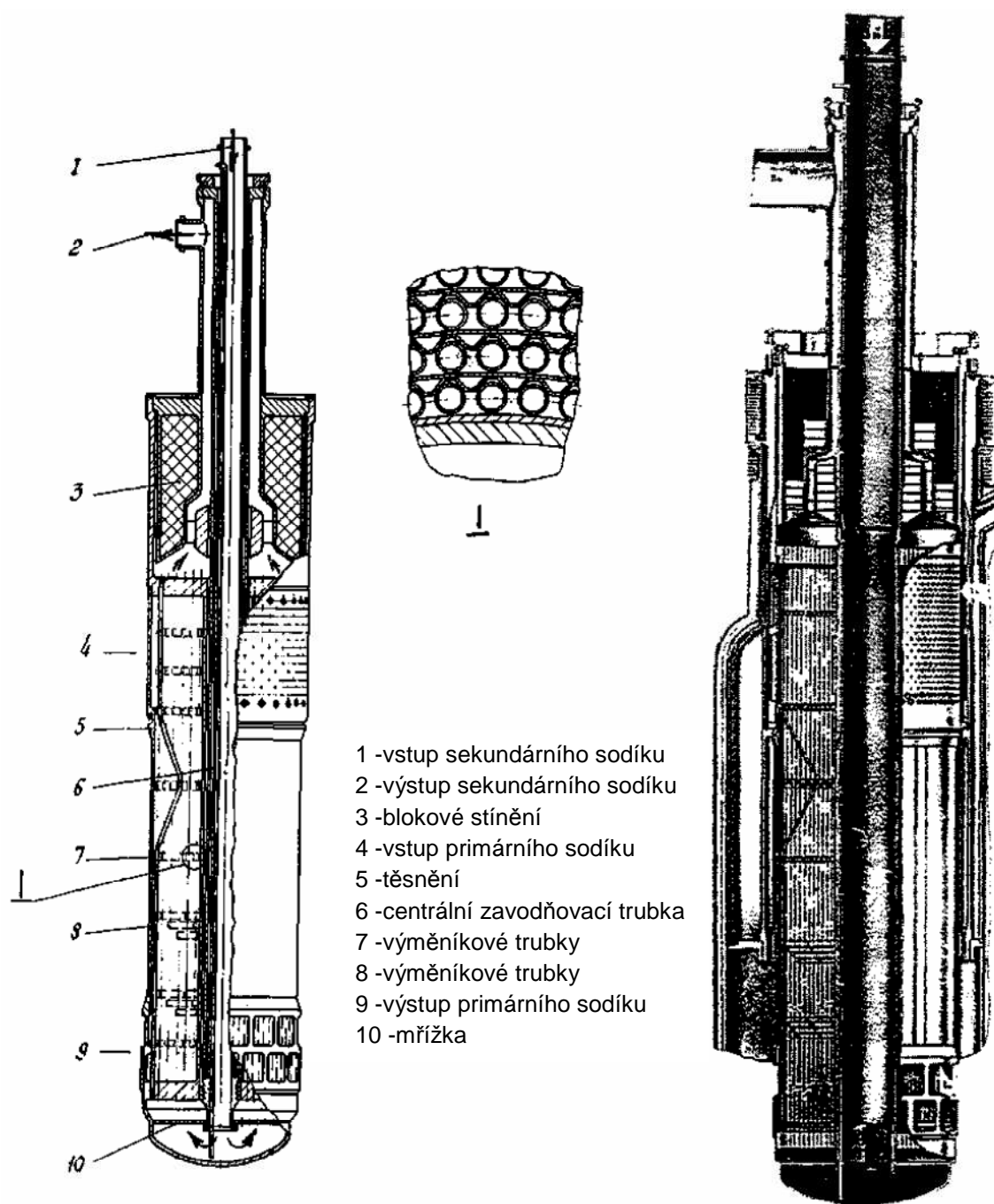
Tabulka 4.14: BN-600, parametry elektrárny [16]

	Horká větev	Chladná větev	Jednotka
Teplota chladiva v PO	535	365	°C
Teplota chladiva v SO	510	315	°C
Trubky PO vnější průměr/tloušťka	-	636/16	mm
Trubky SO vnější průměr/tloušťka	630/13	820/13	mm
Materiál trubek PO	Cr18Ni9	Cr18Ni9	
Materiál trubek SO	Cr18Ni9	Cr18Ni9	

Tabulka 4.15: BN-600, parametry IHX [16]

	Hodnota	Jednotka
Počet jednotek pro primární smyčku	2	
Počet trubek	4974	
Nádoba vnější průměr/tloušťka	2070/15	mm
Trubky vnější průměr/tloušťka	16/1,4	mm
Délka trubek	6360	mm
Materiál nádoby	Cr18Ni9	
Materiál trubek	Cr18Ni9	

Elektrárna je integrálně uspořádaná. Princip výměníku podobný jako v předchozím případě.



Obrázek 4.13: BN-600, IHX [21]

4.2.6 Super-Phénix, Francie

První komerční rychlý reaktor. Tepelný výkon reaktoru je dosavadně největší ze všech. Je zde 8 výměníků chladicích tepelný výkon reaktoru 2990 MW_t. Schéma výměníku je na obrázku 4.14.

Tabulka 4.16: Super-Phénix, parametry elektrárny [16]

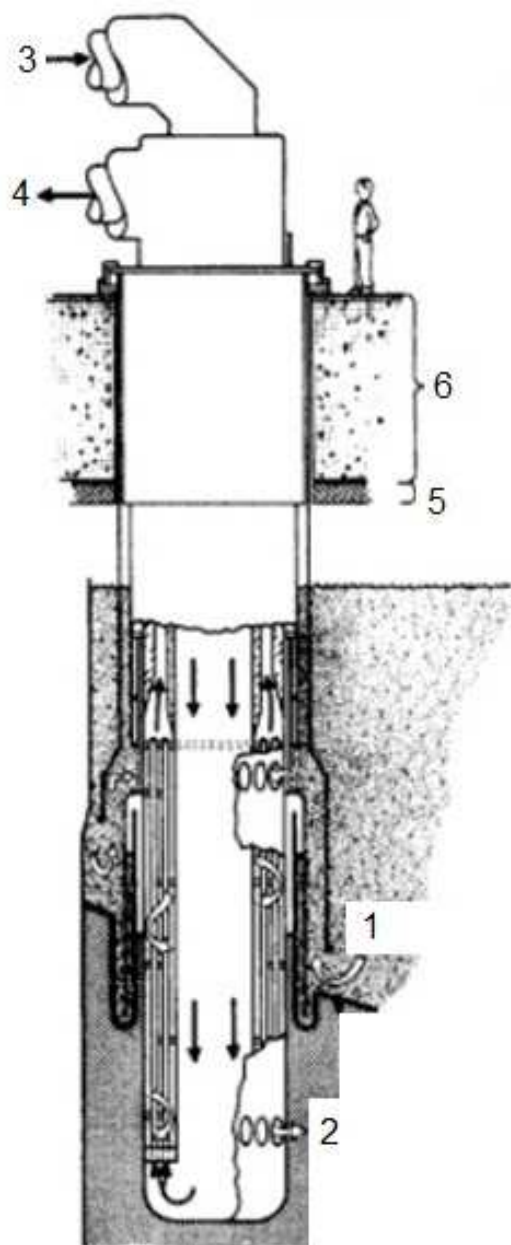
	Hodnota	Jednotka
Uspořádání	integrální	
První kritičnost	1985	rok
Odstavení	1998	rok
Tepelný výkon	2990	MW _t
Elektrický výkon	1242	MW _e
Počet smyček PO/SO	4/4	
Chladiva PO-SO	Na-Na	
Průtok chladiva PO (jedna smyčka)	15700 (3925)	kg.s ⁻¹
Průtok chladiva SO (jedna smyčka)	13100 (3270)	kg.s ⁻¹

Tabulka 4.17: Super-Phénix, parametry elektrárny [16]

	Horká větev	Chladná větev	Jednotka
Teplota chladiva v PO	545	395	°C
Teplota chladiva v SO	525	345	°C
Trubky PO vnější průměr/tloušťka	-	-	mm
Trubky SO vnější průměr/tloušťka	700/11	1000/20	mm
Materiál trubek PO	Cr18Ni12Mo1,8 Si	Cr18Ni10	
Materiál trubek SO	Cr18Ni12Mo2,5 Mn1,8Si	Cr18Ni12Mo 2,5Mn1,8Si	

Tabulka 4.18: Super-Phénix, parametry IHX [16]

	Hodnota	Jednotka
Počet jednotek pro primární smyčku	2	
Počet trubek	5380	
Nádoba vnější průměr/tloušťka	1830/8	mm
Trubky vnější průměr/tloušťka	14/1	mm
Délka trubek	6540	mm
Materiál nádoby	-	
Materiál trubek	-	



Obrázek 4.14: Super-Phénix, IHX [18]

- 1 -vstup primárního sodíku
- 2 -výstup primárního sodíku
- 3 -vstup sekundárního sodíku
- 4 -výstup sekundárního sodíku
- 5 -izolace
- 6 -stínění

4.2.7 BN-800, Beloyarsky-4, Rusko

Tento reaktor je následovník reaktoru BN-600. Stavěn je v Beloyarské jaderné elektrárně. Výměník má podobné parametry jako u BN-600.

Tabulka 4.19: BN-800, parametry elektrárny [16]

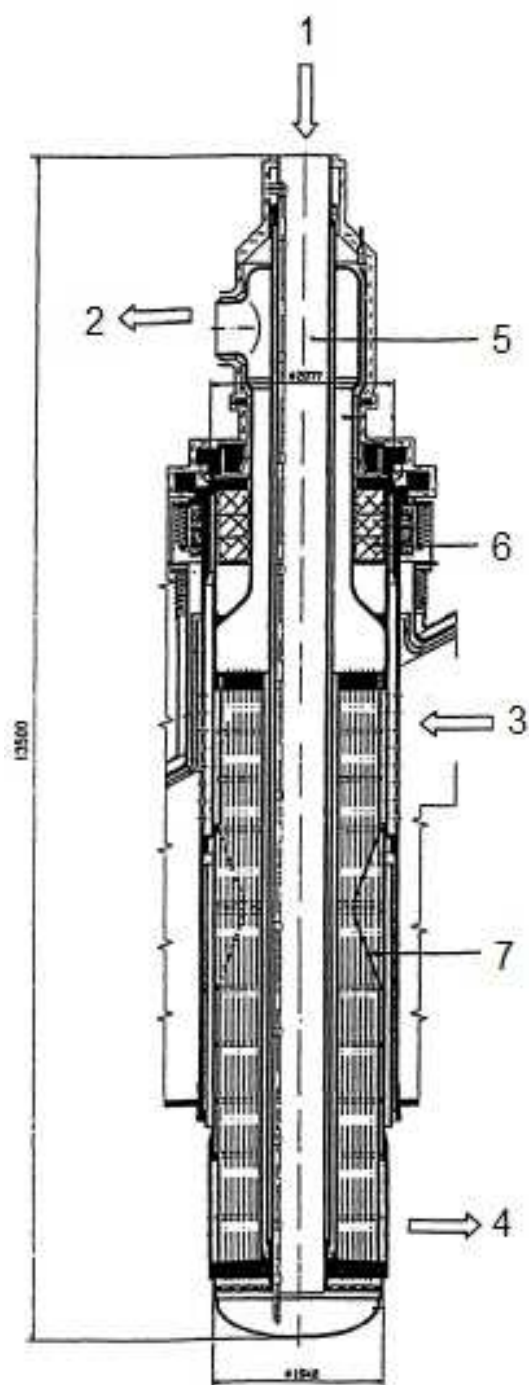
	Hodnota	Jednotka
Uspořádání	integrální	
První kritičnost	konstrukce	
Odstavení	-	
Tepelný výkon	2100	MWt
Elektrický výkon	880	MWe
Počet smyček PO/SO	3/3	
Chladiva PO-SO	Na-Na	
Průtok chladiva PO (jedna smyčka)	8600 (2900)	kg.s-1
Průtok chladiva SO (jedna smyčka)	8400 (2780)	kg.s-1

Tabulka 4.20: BN-800, parametry elektrárny [16]

	Horká větev	Chladná větev	Jednotka
Teplota chladiva v PO	547	354	°C
Teplota chladiva v SO	505	309	°C
Trubky PO vnější průměr/tloušťka	-	636/16	mm
Trubky SO vnější průměr/tloušťka	820/24	820/20	mm
Materiál trubek PO	Cr18Ni9	Cr18Ni9	
Materiál trubek SO	Cr18Ni9	Cr18Ni9	

Tabulka 4.21: BN-800, parametry IHX [16]

	Hodnota	Jednotka
Počet jednotek pro primární smyčku	2	
Počet trubek	4956	
Nádoba vnější průměr/tloušťka	2070/15	mm
Trubky vnější průměr/tloušťka	16/1,4	mm
Délka trubek	6455	mm
Materiál nádoby	Cr18Ni9	
Materiál trubek	Cr18Ni9	



Obrázek 4.15: BN-800, IHX [18]

- 1 -vstup sekundárního sodíku
- 2 -výstup sekundárního sodíku
- 3 -vstup primárního sodíku
- 4 - výstup primárního sodíku
- 5 -centrální zavodňovací trubka
- 6 -stínění
- 7 -výměníkové trubky

5 Teoretické základy výpočtu

Před samotným výpočtem a volbou parametrů jsou v následující kapitole shrnuty výpočtové vztahy potřebné pro tepelný, hydraulický a pevnostní výpočet.

5.1 Tepelný výpočet

Postup tepelného výpočtu zahrnuje následující body [1]:

- předběžný výpočet, z toho plyne volba nádoby, trubek, (průměr, tloušťka, počet) a uspořádání, rozteč trubek atd.
- rozdělení výměníku na úseky a rozvržení předaného tepla do těchto úseků
- stanovení teplot obou látek na mezích jednotlivých úseků
- odečtení měrné tepelné kapacity c_p a určení jednotlivých průtoků primární a sekundární pracovní látky
- průtočný průřez
- střední rychlost proudění
- podobnostní čísla
- součinitel přestupu tepla
- logaritmický teplotní spád
- součinitel prostupu tepla
- celková výhřevná plocha
- střední délka trubek

5.1.1 I. zákon termomechaniky

Pro otevřenou soustavu a stacionární děj [9]:

$$dq = da + di + \frac{dw^2}{2} + qdz \quad [\text{kJ.kg}^{-1}] \quad (5.1)$$

q - teplo sdělené mezi soustavou a okolím $[\text{kJ.kg}^{-1}]$

a - práce $[\text{kJ.kg}^{-1}]$

i - entalpie $[\text{kJ.kg}^{-1}]$

Protože u výměníků tepla se dá považovat $\frac{dw^2}{2} = 0$ a $qdz=0$, rovněž nedochází k práci tak $a=0$ je výraz zjednodušen [9]:

$$q = (i_i - i_o) \quad [\text{kJ.kg}^{-1}]$$

$$Q = \dot{m} \cdot (i_i - i_o) \text{ [kW]}$$

neboli:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_i - t_o) \text{ [kW]} \quad (5.2)$$

\dot{m} - hmotnostní průtok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

t_i - teplota na vstupu [$^{\circ}\text{C}$]

t_o - teplota na výstupu [$^{\circ}\text{C}$]

Q - výkon [kW]

c_p - měrná tepelná kapacita [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

5.1.2 Tepelná bilance

Po rozdělení tepelného výkonu na jednotlivé úseky musí platit,

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \text{ [kW]} \quad (5.3)$$

n - počet úseků výměníku

protože tepelný výkon je rozdělen na n stejných úseků, pro každý úsek platí:

$$Q_n = \frac{Q}{n} \text{ [kW]} \quad (5.4)$$

5.1.3 Teploty

Jestliže je celkový tepelný výkon rozdělen na n úseků o stejném výkonu, dá se říci, že $Q_1=Q_2=Q_n=\text{konstanta}$, rovněž pro $c_{p1} \cdot \dot{m}_1 = c_{p2} \cdot \dot{m}_2 = c_{pn} \cdot \dot{m}_n = \text{konstanta}$ a tedy platí

$$\frac{Q_1}{c_{p1} \cdot \dot{m}_{S1}} = \frac{Q_2}{c_{p2} \cdot \dot{m}_{S2}} = \frac{Q_n}{c_{pn} \cdot \dot{m}_{Sn}} = \text{konst.} \quad (5.5)$$

z toho plyne, že rozdíl teplot v každém úseku je stejný,

$$(t_{1i} - t_{1o}) = (t_{2i} - t_{2o}) = (t_{ni} - t_{no}) = \text{konst.} \quad (5.6)$$

proto se může napsat

$$(t_{mi} - t_{mo}) = \frac{(t_i - t_o)}{n} \text{ [}^{\circ}\text{C}]$$

a po úpravě,

$$t_{mo} = t_{mi} - \frac{(t_i - t_o)}{n} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.7)$$

kde n je počet úseků a m je konkrétní úsek od 1 do n .

Pro primární sodík platí rovnice (5.7) a obdobně pro sekundární platí rovnice následující.

$$t_{mo} = t_{mi} + \frac{(t_o - t_i)}{n} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.8)$$

5.1.4 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] se určí pro jednotlivé úseky z jejich průměrné teploty.

$$t_{prum,m} = \frac{(t_{mi} + t_{mo})}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.9)$$

$t_{prum,m}$ - průměrná teplota v m -tém úseku

5.1.5 Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtoky v jednotlivých úsecích se vypočítají ze vztahů

$$\dot{m}_p = \frac{Q}{c_p \cdot (t_{pi} - t_{po})} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.10)$$

\dot{m}_p - hmotnostní průtok primárního sodíku

t_{pi} - teplota primárního sodíku na vstupu [$^\circ\text{C}$]

t_{po} - teplota primárního sodíku na výstupu [$^\circ\text{C}$]

Q - výkon příslušný k teplotnímu úseku [W]

c_p - měrná tepelná kapacita sodíku pro danou teplotu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$$\dot{m}_s = \frac{Q}{c_p \cdot (t_{so} - t_{si})} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.11)$$

\dot{m}_s - hmotnostní průtok sekundárního sodíku

t_{si} - teplota sekundárního sodíku na vstupu [$^\circ\text{C}$]

t_{so} - teplota sekundárního sodíku na výstupu [$^\circ\text{C}$]

5.1.6 Průtočný průřez

Pro výpočet průtočného průřezu je třeba znát průměry trubek, počet trubek, rozteč trubek a z toho plynoucí vnitřní průměr nádoby a vnější průměr centrálního otvoru. Při volení jednotlivých parametrů se vychází z příslušných norem, přičemž minimální rozteč trubek musí splňovat i podmínku (5.12) [11] plynoucí z technologie upevnění trubek v trubkovnici. Touto technologií je zavěření se zaválcováním viz kapitola 6.4.

$$s'_{min} = d'_2 + 2 \cdot s_t \quad [\text{m}] \quad (5.12)$$

s'_{min} - minimální vypočtená rozteč

d'_2 - průměr otvoru v trubkovnici

s_t - tloušťka trubky

Průtočný průřez v mezitrubkovém prostoru, tedy průtočný průřez pro primární médium se spočítá ze vztahu,

$$A_p = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{CT2}^2}{4} - n_t \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \quad [\text{m}^2]$$

po úpravě

$$A_p = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_{CT2}^2 - n_t \cdot d_2^2) \quad [\text{m}^2] \quad (5.13)$$

D_1 - vnitřní průměr pláště trubkovnice [m]

D_{CT2} - vnější průměr centrální trubky [m]

d_2 - vnější průměr trubky [m]

n_t - počet trubek [m]

a pro sekundární médium.

$$A_s = n_t \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (5.14)$$

d_1 - vnitřní průměr trubky [m]

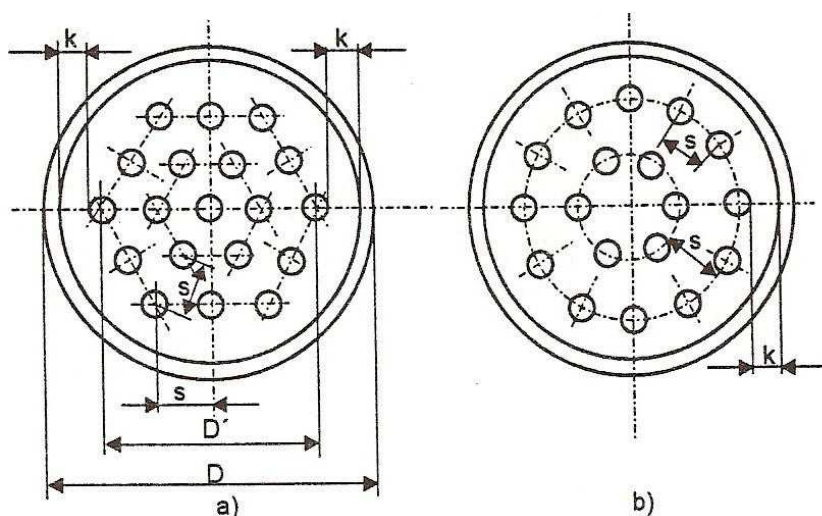
Výpočet průtočného průřezu centrální trubkou je obdobný.

$$A_{SCT} = \frac{\pi \cdot D_{CT1}^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (5.15)$$

D_{CT1} - vnitřní průměr centrální trubky [m]

5.1.7 Počet trubek

Dále je odvozen vztah pro výpočet počtu trubek v mezivýměníku. Je třeba upřesnit rozmístění trubek v průtočném průřezu. Vycházet se dá z dvou typických variant, a to je uspořádání trojúhelníkové, nebo uspořádání na kružnicích (viz obrázek).



Obrázek 5.1: Trojúhelníkové a kruhové uspořádání trubek [9]

Odvození je uvedeno pro trojúhelníkové uspořádání a slouží pro odhad počtu teplosměnných trubek v mezikruhovém prostoru. Nejdříve počet řad neboli šestiúhelnů bez uvažování středového otvoru.

$$n_r = \frac{D_1}{2 \cdot s_{\min}} \quad [-] \quad (5.16)$$

D_1 - vnitřní průměr pláště trubkovnice [mm]

s_{\min} - minimální rozteč trubek [mm]

Počet řad musí být celé číslo, proto je třeba nejdříve předběžně vypočítat počet řad, zaokrouhlit a pak následně vypočítat pro tento počet řad průměr pláště.

Počet trubek na jednotlivých řadách se bude lišit, protože se řady zvětšují, obecně se dá napsat

$$n_{ti} = (i - 1) \cdot 6 \quad [-] \quad (5.17)$$

D_{ni} - průměr i-té kružnice [mm]

n_{ti} - počet trubek na i-té řadě

výjimku bude tvořit první řada, na ní je pouze jedna trubka.

Pro počet trubek pak platí:

$$n = 1 + \sum_{i=2}^{n_r} (i - 1) \cdot 6 \quad [-] \quad (5.18)$$

K výslednému počtu trubek je ještě třeba připočíst trubky vyplňující mezery mezi stranami šestiúhelníku a kružnicí. Na každé straně je připočtena jedna řada trubek bez čtyř krajních:

$$n_v = 1 + [6 \cdot (n_r - 5)] + \sum_{i=2}^{n_r} (i - 1) \cdot 6 \quad [-] \quad (5.19)$$

Podobným způsobem se vypočítá počet trubek, které se musí odebrat kvůli středové trubce, tedy vztah,

$$n_M = 1 + [6 \cdot (n_r - 1) + 6 \cdot (n_r - 6)] + \sum_{i=2}^{n_r} (i - 1) \cdot 6 \quad [-] \quad (5.20)$$

výsledný počet trubek je rozdíl vztahů (5.19) a (5.20).

$$n_t = n_V - n_M \quad [-] \quad (5.21)$$

5.1.8 Střední rychlost proudění

Pro výpočet střední rychlosti proudění je potřeba určit hustotu látky. Ta se určí pomocí průměrné teploty daného úseku [1].

$$v_s = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.22)$$

\dot{m} - hmotnostní průtok $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

ρ - hustota $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

A - průtočný průřez $[\text{m}^2]$

5.1.9 Podobnostní čísla

Opět je pomocí průměrné teploty v daném úseku určena kinematičká viskozita.

Reynoldsovo číslo [7]:

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad [-] \quad (5.23)$$

v_s - střední rychlost $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

d - charakterističký rozměr $[\text{m}]$

ν - kinematičká viskozita $[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$

Za charakterističký rozměr d u proudění podélného k trubkám se bere ekvivalentní (hydrauličký) průměr d_e . Pro proudění primární látky tento průměr se spočítá ze vztahu,

$$d_e = \frac{4 \cdot A}{O} \quad [\text{m}] \quad (5.24)$$

O - smočený obvod průtočného průřezu $[\text{m}]$

dále je uveden vztah na výpočet smáčeného obvodu pro proudění primární látky,

$$O_p = \pi \cdot (D_1 + D_{CT2} + n_t \cdot d_2) \quad [\text{m}] \quad (5.25)$$

O_p - smáčený obvod v primární části výměníku

u sekundární látky, kdy je proudění pouze uvnitř totožných trubek, se vychází ze stejného vztahu, ovšem po úpravě vyjde:

$$d_e = d_1 \text{ [m]} \quad (5.26)$$

Prandtlovo číslo [7]:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{ [-]} \quad (5.27)$$

a - tepelná vodivost [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Pecletovo číslo [7]:

$$Pe = Re \cdot Pr \text{ [-]} \quad (5.28)$$

Nusseltovo číslo:

Pro kapalný kov jako primární látku v mezitrubkovém prostoru je použit vztah (5.29). Tento vztah platí pro Pecletovo číslo v rozmezí 80 až 4000 a pro poměr rozteče ke vnějšímu průměru trubky s_{\min}/d_2 v intervalu 1,1 až 1,5 [5],

$$Nu = 0,58 \cdot \left(\frac{d_r}{d_2}\right)^{0,55} \cdot Pe^{0,45} \text{ [-]} \quad (5.29)$$

kde

$$d_r = d_2 \cdot \left[1,1 \cdot \left(\frac{s_{\min}}{d_2}\right)^2 - 1\right] \text{ [m]} \quad (5.30)$$

pro sekundární látku v trubkovém prostoru u kapalného kovu platí [7]

$$Nu = 4,5 + 0,014 \cdot Pe^{0,8} \text{ [-]} \quad (5.31)$$

vztah platí pro $l/d > 30$, Re v rozmezí 10^4 až 10^6 a Pr od $4 \cdot 10^{-3}$ do $3,2 \cdot 10^{-2}$.

5.1.10 Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla se spočítá ze vztahu [7].

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_s}{d_e} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.32)$$

λ_s - tepelná vodivost sodíku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

d_e - ekvivalentní hydraulický průměr [m]

5.1.11 Logaritmický teplotní spád

U výpočtu logaritmického teplotního spádu je třeba znát rozdíly teplot na vstupu primárního a výstupu sekundárního sodíku (5.33) a na výstupu primárního a vstupu sekundárního (5.34).

$$\Delta t_1 = t_{Po} - t_{Si} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.33)$$

$$\Delta t_2 = t_{Pi} - t_{So} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.34)$$

Logaritmický teplotní spád se spočítá ze vztahu [1]:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.35)$$

5.1.12 Prostup tepla

Pro výpočet prostupu tepla je použit následující vztah, ve vztahu vystupuje tepelná vodivost materiálu trubek [1].

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{d}{d_2}} \text{ [W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}\text{]} \quad (5.36)$$

d - výpočtový průměr trubky [m]

d_1 - vnitřní průměr trubky [m]

d_2 - vnější průměr trubky [m]

α_1 - součinitel přestupu tepla pro médium uvnitř trubky [W.m⁻².K⁻¹]

α_2 - součinitel přestupu tepla pro médium vně trubky [W.m⁻².K⁻¹]

λ_m - tepelná vodivost materiálu trubky [W.m⁻¹.K⁻¹]

Vztah pro výpočet výpočtového průměru.

$$d = \frac{d_2 + d_1}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.37)$$

5.1.13 Výhřevná plocha

Do výpočtu výhřevné plochy vstupuje tepelný výkon, logaritmický teplotní spád a součinitel prostupu tepla [1].

$$S = \frac{Q}{\Delta t \cdot k} \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.38)$$

5.1.14 Střední délka trubek

Závěrem tepelného výpočtu je určení potřebné délky teplosměnných trubek. Ta se vypočítá z následujícího vztahu [1].

$$l_{str} = \frac{S}{\pi \cdot d \cdot n_t} \text{ [m]} \quad (5.39)$$

S - výhřevná plocha [m²]

d - výpočtový průměr [m]

n_t - počet trubek

Při úvaze, že je výpočet prováděn pro jednotlivé úseky *i* a s počtem úseků *n*, je pak výsledná délka trubek jejich součtem.

$$l_{str} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{\pi \cdot d \cdot n_t} \right) \text{ [m]} \quad (5.40)$$

5.2 Hydraulický výpočet

Hydraulický výpočet je zaměřen jen na odhad tlakových ztrát. Na médium proudící ve výměníku působí různé vlivy jako jsou drsnost potrubí, záhyby, změny průměrů apod., proto ztrácí část své tlakové energie. Pro určení těchto ztrát je potřeba znát konstrukční řešení výměníku s přesnými rozměry. Teorie výpočtu je čerpána z literatury [1] a [8].

Výsledná tlaková ztráta je součtem tlakových ztrát třením a tlakových ztrát místními odpory.

$$\Delta p_z = \Delta p_t + \Delta p_m \text{ [Pa]} \quad (5.41)$$

5.2.1 Tlaková ztráta třením

Tlaková ztráta třením je způsobena třením kapaliny o stěny potrubí a určí se vztahem:

$$\Delta p_t = \lambda \cdot \frac{l}{d_e} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} \text{ [Pa]} \quad (5.42)$$

l - délka trubky [m]

d_e - hydraulický průměr [m]

v - rychlost proudění chladicího média [m.s⁻¹]

ρ - hustota chladicího média [kg.m⁻³]

λ - součinitel tlakové ztráty

$$\lambda = \frac{1}{\left[1,74 + 2 \cdot \ln \left(\frac{d}{2\Delta} \right) \right]^2} \quad (5.43)$$

Δ - absolutní drsnost [m]

d - charakteristický rozměr [m]

5.2.2 Tlaková ztráta místními odpory

Tlakovou ztrátu místními odpory způsobují různé prvky a záhyby v trase proudění kapaliny.

$$\Delta p_m = \sum \xi_m \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} \text{ [Pa]} \quad (5.44)$$

ξ_m -součinitel místních odporů

V případě příčného obtékání trubkového svazku do vztahu vstupuje ztrátový součinitel ξ_p .

$$\Delta p_m = \sum \xi_m \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} + \xi_p \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} \text{ [Pa]} \quad (5.45)$$

ξ_p -ztrátový součinitel příčně obtékaného trubkového svazku

V následující tabulce jsou shrnuty součinitele místních odporů pro výměník.

Tabulka 5.1: Součinitele místních odporů [8]

	Značení	Hodnota
Výstup z centrální trubky	ξ_{mCT}	1
Spodní plovoucí trubkovnice	ξ_{mPT}	0,5
Vstup do teplosměnných trubek	ξ_{mTT1}	0,5
Výstup z teplosměnných trubek	ξ_{mTT2}	1
Výstup z víka výměníku	ξ_{mSG}	0,75
Vstup do mezitrubkového prostoru	ξ_{mMP1}	1
Výstup z mezitrubkového prostoru	ξ_{mMP2}	0,5
Průchod rozváděcím prstencem	ξ_{mRP}	1,5
Příčné obtékání trubkového svazku	ξ_p	12,5

5.2.3 Hydrostatický tlak

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa]} \quad (5.46)$$

ρ -hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

h -výška hladiny kapaliny [m]

g -gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

5.3 Pevnostní výpočet

Pevnostní výpočet je zaměřen jen na kontrolu tloušťky stěny a dovoleného tlaku u nádoby výměníku. Nádoba je rozdělena na válcovou část a eliptické dno. Celý výpočet čerpá z literatury [12].

5.3.1 Válcová část

Podmínka, pro kterou platí výpočet:

$$\frac{s_N}{D_{N1}} \leq 0,1 \text{ pro } D_{N1} \geq 0,2 \text{ m} \quad (5.47)$$

s_N -tloušťka stěny nádoby [m]

D_{N1} -vnitřní průměr nádoby [m]

Kontrola tloušťky stěny nádoby

$$s_N = \frac{p \cdot D_{N1}}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} \text{ [m]} \quad (5.48)$$

φ_p -součinitel hodnoty podélného svaru

σ -dovolené namáhání [Pa]

p -pracovní tlak [Pa]

dovolený vnitřní přetlak

$$p_{Nmax} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_N - c)}{D_{N1} + (s_N - c)} \text{ [Pa]} \quad (5.49)$$

c -přídavky materiálu na stěně nádoby [m]

5.3.2 Eliptické dno

Výpočet výšky H eliptického dna. Tato výška je od konce válcové části po vrch eliptické části.

$$H = 0,25 D_{N1} \text{ [m]} \quad (5.50)$$

Poloměr křivosti je roven průměru válcové části.

$$R_{N1} = D_{N1} \text{ [m]} \quad (5.51)$$

Podmínky výpočtu:

$$0,002 \leq \frac{s_N - c}{D_{N1}} \leq 0,1 \quad (5.52)$$

$$0,2 \leq \frac{H}{D_{N1}} \leq 0,5 \quad (5.53)$$

Kontrola tloušťky stěny eliptického dna

$$s_{ND} = \frac{p \cdot R_{N1}}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - 0,5 \cdot p} \text{ [m]} \quad (5.54)$$

dovolený vnitřní přetlak.

$$p_{NDmax} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_N - c)}{R_{N1} + 0,5 \cdot (s_N - c)} \text{ [Pa]} \quad (5.55)$$

6 Návrhový výpočet

Zde jsou shrnuty volené rozměry, zadané a předpokládané hodnoty a první předběžné výpočtové odhady.

6.1 Zadané hodnoty

Vychází se z parametrů pro evropský projekt SFR. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce:

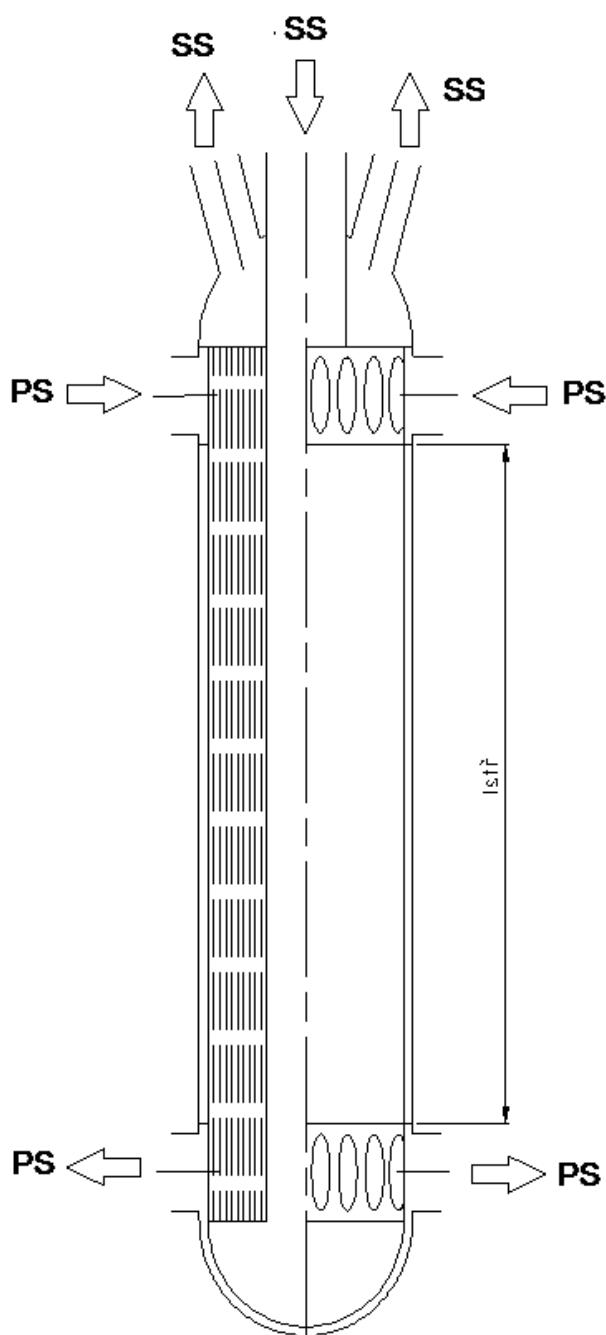
Tabulka 6.1: Parametry výměníku ESFR [14]

	Hodnota	Jednotka
Tepelný výkon reaktoru	3600	MWt
Počet smyček	6	
Výkon jednoho IHX	600	MWt
Teplota primárního sodíku na vstupu	545	°C
Teplota primárního sodíku na výstupu	395	°C
Teplota sekundárního sodíku na vstupu	340	°C
Teplota sekundárního sodíku na výstupu	525	°C

6.2 Volba konstrukce

Elektrárna má možnost dvou provedení integrální a smyčkové. Každé má své výhody i nevýhody uvedeny v kapitole 3.5.1 a 3.5.2. Pro následující výpočet je voleno smyčkové uspořádání. Konstrukce bude vyžadovat vyšší nároky na bezpečnost, ale bude přístupná případným opravám. Rovněž 6 smyček by znamenalo velké rozměry nádoby. Dá se tedy říct, že zvýšené konstrukční požadavky a tím zvýšené finanční nároky na konstrukci výměníku, budou kompenzovány nižšími finančními nároky na reaktorovou nádobu.

Pro volbu koncepce samotného výměníku se vychází ze zkušenostmi ověřeného provedení, a to je vertikální válcový výměník s centrální trubicí pro přívod sekundárního sodíku. Centrální trubka prochází víkem výměníku a je ukončena ve spodní plovoucí trubkovnici. Okolo centrální trubky jsou na šestiúhelníkových řadách uspořádány teplosměnné trubky. Tyto trubky jsou ukotveny v horní pevné a dolní plovoucí trubkovnici a sekundární sodík jimi bude procházet z dolní části do horní. Nad horní trubkovnicí je komora do které bude vystupovat sodík z trubek. Z této komory bude odváděn otvorem ve víku výměníku. Primární sodík bude přiváděn dvěma trubicemi na bocích do rozváděcího prstence. V rozváděcím prstenci jsou eliptické otvory, kterými bude po celém obvodu vtékat sodík do mezitrubkového prostoru. Dvě přívodní trubky jsou zde pro lepší zaplavení mezitrubkového prostoru. Podobným způsobem bude sodík z mezitrubkového prostoru odváděn ve spodní části výměníku. Ve dně výměníku je vypouštěcí otvor, pro úplné vypuštění sodíku z mezitrubkového prostoru.



Jsou voleny jednoduché trubky, protože přenos tepla je v nich intenzivnější a zároveň mají menší finanční nároky. Jednoduché trubky dostatečně vyhovují bezpečnostním požadavkům. Uspořádání trubek v trubkovnici je trojúhelníkové.

Obrázek 6.1: Předběžný náčrt výměníku

6.3 Volba materiálu

Jako materiál je volena ocel 10CrMo9-10 (15313.5), její vlastnosti jsou v tabulce 62. Norma materiálu ČSN 42 0251. Rozměrová norma ČSN 42 5715 a ČSN 42 5716. Materiál je stejný jak pro trubky, tak pro nádobu. Trubky jsou tvářené za tepla bezešvé. Normalizačně žíhané a popouštěné. Vlastnosti materiálu jsou potřeba i v pevnostním výpočtu [11].

Tabulka 6.2: Vlastnosti materiálu 10CrMo9-10 [13]

	Hodnota	Jednotka
Tepelná vodivost (λ) při 500°C	31,4	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Dovolené napětí (σ) při 500°C	186	MPa
Mez pevnosti v tahu (R_m)	480-630	MPa
Mez kluzu v tahu ($R_{p0,2}$)	265	MPa

6.4 Volba technologie

Trubky jsou v trubkovnicích zavařeny koutovým $\frac{1}{2}$ V svarem a zavalčovány.

6.5 Volba základních rozměrů

V dalším kroku jsou voleny první potřebné rozměry trubek.

Tabulka 6.3: Volené rozměry

	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr teplosměnná trubky	16	mm
Vnitřní průměr teplosměnná trubky	13,2	mm
Tloušťka teplosměnné trubky	1,4	mm
Rozteč teplosměnných trubek	21	mm

6.6 Tepelný výpočet mezivýměníku v 1. přiblížení

Tento tepelný výpočet je na základě předběžných odhadů součinitele přestupu tepla. Slouží k přesnější volbě počtu trubek a základních rozměrů.

6.6.1 Předběžný odhad součinitele přestupu tepla

Pro předběžný výpočet jsou odhadnuty součinitele přestupu tepla.

Tabulka 6.4: Odhadované součinitele přestupu tepla

	Hodnota	Jednotka
$\alpha_{p\text{pred}}$ (mezitrubkový prostor)	30 000	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
$\alpha_{s\text{pred}}$ (trubkový prostor)	40 000	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

6.6.2 Předběžný výpočet prostupu tepla

Na úvod je ze vztahu (5.37) vypočítán výpočtový průměr d ,

$$d = \frac{d_2 + d_1}{2} = \frac{16 + 13,2}{2} = 14,6 \text{ mm}$$

podle vztahu (5.35) pak předběžné Δt

$$\Delta t_{1pred} = t_{Po} - t_{Si} = 395 - 340 = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{2pred} = t_{Pi} - t_{So} = 545 - 525 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{pred} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{55 - 20}{\ln \frac{55}{20}} = 34,60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

a předběžný součinitel prostupu tepla (vztah 5.36).

$$k_{pred} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{Pred} d_1} + \frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{Pred} d_2}} = \frac{1}{\frac{1}{30000 \cdot 0,0146} + \frac{1}{2 \cdot 31,4} \ln \frac{0,016}{0,0132} + \frac{1}{40000 \cdot 0,016}}$$

$$k_{pred} = 9728,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.6.3 Návrh počtu trubek

Vezmou-li se rovnice (5.38) a (5.39), vloží dohromady a vyjádří se z nich počet trubek, dostane se vztah, pomocí kterého se může zhruba odhadnout počet trubek pro daný výkon a délku.

$$n_{tpred} = \frac{Q}{\pi \cdot d \cdot l_{pred} \cdot \Delta t \cdot k} \quad [-] \quad (6.1)$$

n_{tpred} - předběžný odhad počtu teplosměnných trubek

l_{pred} - předběžná délka teplosměnných trubek [m]

Pomocí výše uvedeného vztahu je určen potřebný počet teplosměnných trubek pro určitou délku a konkrétní výkon. Výpočet je znázorněn pro délku 5,0 m a výkon 300 MW.

$$n_{pred5,0} = \frac{Q}{\pi \cdot d \cdot l_{pred} \cdot \Delta t \cdot k} = \frac{300\,000\,000}{\pi \cdot 0,0146 \cdot 5,0 \cdot 34,6 \cdot 9728,42} = 3886$$

Tabulka 6.5: Předběžný odhad počtu teplosměnných trubek pro výkon a délku

Délka trubek l_{pred} [m]	Výkon Q [MW]		
	300 (12 smyček)	600 (6 smyček)	900 (3 smyčky)
5,0	3 886	7 773	11 659
5,5	3 533	7 066	10 599
6,0	3 239	6 477	9 716
6,5	2 990	5 979	8 969
7,0	2 776	5 552	8 328
7,5	2 591	5 182	7 773
8,0	2 429	4 858	7 287
8,5	2 286	4 572	6 858
9,0	2 159	4 318	6 477

V tabulce 6.5 jsou uvedeny počty trubek pro výkon 600 MW a pro srovnání i pro 300 a 900 MW. Pro další výpočet je uvažován standardní tepelný výkon výměníku 600 MW.

Pomocí vztahu odvozeného v kapitole 5.1.7 je určen počet trubek pro různé průměry centrální trubky a pláště trubkovnice.

Tabulka 6.6: Počty teplosměnných trubek pro různé průměry

Vnitřní průměr pláště D_1 [mm]	Vnější průměr centrální trubky D_{CT2} [mm]		
	588	672	840
1890	5 508	5 310	4 842
1974	6 066	5 868	5 400
2016	6 354	6 156	5 688
2058	6 648	6 450	5 982
2100	6 948	6 750	6 282
2142	7 254	7 056	6 588
2184	7 566	7 368	6 900
2226	7 884	7 686	7 218

Dalším faktorem, ke kterému je vhodné přihlédnout, je rozdíl mezi průtočným průřezem jednotlivých teplosměnných trubek a průtočným průřezem centrální trubky, který by neměl být příliš velký.

Ze vztahů (5.14) a (5.15) je vyjádřen vnitřní průměr centrální trubky a po dosazení různých počtů trubek se dostane odpovídající vnitřní průměr. Vnější průměr je větší o tloušťku stěny, což je zanedbatelné, proto není potřeba přepočítávat průměr.

$$D_{CT1} = d_1 \cdot \sqrt{n_t} \text{ [mm]} \quad (6.2)$$

Výpočet je uveden pro počet trubek 4842.

$$D_{CT1} = d_1 \cdot \sqrt{n_t} = 13,2 \cdot \sqrt{4842} = 919 \text{ mm}$$

Tabulka 6.7: Vnitřní průměry centrální trubky odpovídající počtu teplosměnných trubek

Počet trubek [-]	Vnitřní průměr centrální trubky [mm]
4 842	919
5 310	961
5 400	970
5 508	980
5 688	996
5 868	1011
5 982	1021
6 156	1036
6 282	1046
6 588	1071

Přesný počet trubek je volen z tabulky 6.6 s přihlédnutím do tabulky 6.5 a po zhodnocení pomocí tabulky 6.7.

6.7 Volba dalších rozměrů

V následující tabulce jsou shrnuty další volené rozměry.

Tabulka 6.8: Volené rozměry

	Hodnota	Jednotka
Počet teplosměnných trubek	5 688	
Průměr pláště trubkovnice D_1	2016	mm
Vnitřní průměr centrální trubky D_{CT1}	810	mm
Vnější průměr centrální trubky D_{CT2}	840	mm
Tloušťka centrální trubky	15	mm

7 Výpočtová část

7.1 Tepelný výpočet

Termofyzikální vlastnosti sodíku v následujících výpočtech jsou určovány podle tabulky 3.2.

7.1.1 Průtok a rychlost proudění

Výměník je rozdělen na 5 úseků o stejném tepelném výkonu. Jestliže je jeho celkový tepelný výkon 600 MW_t , pak pro každý úsek platí,

$$Q_n = \frac{600}{5} = 120 \text{ MW}_t$$

každý úsek má tepelný výkon 120 MW_t .

Podle vztahů (5.7) a (5.8) jsou vypočítány teploty. Názorně je zde předveden výpočet pro jeden úsek. V obou případech je to úsek, kdy sodík vstupuje do výměníku, tedy pro primární stranu úsek číslo 1 a pro sekundární stranu úsek číslo 5. Všechny úseky jsou vypočítány stejným způsobem. Hodnoty teplot vystupujících ve výpočtu jsou uvedeny v tabulce 6.1. Výsledné údaje jsou shrnuty v tabulce 7.1.

$$t_{1o} = t_{1i} - \frac{(t_i - t_o)}{n} = 545 - \frac{(545 - 395)}{5} = 515 \text{ }^{\circ}\text{C}$$
$$t_{5o} = t_{5i} + \frac{(t_o - t_i)}{n} = 340 + \frac{(525 - 340)}{5} = 377 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tabulka 7.1: Vypočítané hodnoty

	Počet úseků n				
	1	2	3	4	5
Tepelný výkon [MW]	120	120	120	120	120
PS: teplota vstup [°C]	545	515	485	455	425
PS: teplota výstup [°C]	515	485	455	425	395
SS: teplota vstup [°C]	488	451	414	377	340
SS: teplota výstup [°C]	525	488	451	414	377

Pro další část výpočtu je vypočtena ze vztahu (5.9) průměrná teplota sodíku v každém úseku.

$$t_{prum,P1} = \frac{(t_{P1i} + t_{P1o})}{2} = \frac{(545 + 515)}{2} = 530 \text{ }^{\circ}\text{C}$$
$$t_{prum,S5} = \frac{(t_{S5i} + t_{S5o})}{2} = \frac{(340 + 377)}{2} = 358,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Pomocí této teploty je určena měrná tepelná kapacita c_p a podle vztahů (5.10) a (5.11) dopočítány hmotností průtoky.

$$\dot{m}_{P1} = \frac{Q_1}{c_{p1} \cdot (t_{P1i} - t_{P1o})} = \frac{120\,000\,000}{1272,34 \cdot (545 - 515)} = 3143,8 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{S5} = \frac{Q_5}{c_{p5} \cdot (t_{S5o} - t_{S5i})} = \frac{120\,000\,000}{1272,47 \cdot (377 - 340)} = 2548,78 \text{ kg.s}^{-1}$$

Výpočet je uveden opět pouze pro jeden úsek na každé straně výměníku. Hodnoty všech úseků jsou v tabulce 7.2.

Tabulka 7.2: Vypočítané hodnoty

	Počet úseků n				
	1	2	3	4	5
PS: průměrná teplota [°C]	530	500	470	440	410
PS: tepelná kapacita [J.kg⁻¹.K⁻¹]	1272,34	1272,79	1272,85	1272,81	1272,87
PS: hmotnostní průtok [kg.s⁻¹]	3143,80	3142,71	3142,55	3142,66	3142,50
SS: průměrná teplota [°C]	506,5	469,5	432,5	395,5	358,5
SS: tepelná kapacita [J.kg⁻¹.K⁻¹]	1272,68	1272,85	1272,84	1272,72	1272,47
SS: hmotnostní průtok [kg.s⁻¹]	2548,35	2548,02	2548,04	2548,28	2548,78

Do výpočtu pro průtočný průřez primárního sodíku vstupuje vnitřní průměr pláště, vnější průměr centrální trubky, vnější průměr teplosměnných trubek a počet teplosměnných trubek. Do výpočtu průtočného průřezu sekundárního sodíku vstupuje počet teplosměnných trubek a vnitřní průměr teplosměnných trubek. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 6.3 a 6.8. Použité výpočtové vztahy jsou (5.13) a (5.14).

$$A_P = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_{CT2}^2 - n_t \cdot d_2^2) = \frac{\pi}{4} (2,016^2 - 0,84^2 - 5688 \cdot 0,016^2) = 1,49 \text{ m}^2$$

$$A_S = n_t \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = 5688 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0132^2}{4} = 0,78 \text{ m}^2$$

Pomocí průměrné teploty sodíku je určena hustota sodíku pro každý úsek primární i sekundární části. Pomocí vztahu (5.22), ve kterém jsou zahrnuty předchozí výpočty hmotnostního průtoku (tabulka 7.2) a průtočného průřezu je dopočítána střední rychlost proudění v_s .

$$v_{SP1} = \frac{\dot{m}_{P1}}{\rho_{P1} \cdot A_P} = \frac{3143,8}{821,8 \cdot 1,49} = 2,56 \text{ m.s}^{-1}$$

$$v_{SS5} = \frac{\dot{m}_{S5}}{\rho_{S5} \cdot A_S} = \frac{2548,78}{864 \cdot 0,78} = 3,79 \text{ m.s}^{-1}$$

Stejným způsobem jako v uvedeném příkladě jsou dopočítány hodnoty všech středních rychlostí a uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 7.3: Vypočítané hodnoty

	Počet úseků n				
	1	2	3	4	5
PS: průměrná teplota [°C]	530	500	470	440	410
PS: hustota [kg.m⁻³]	821,8	829,0	836,8	844,4	851,6
PS: střední rychlost [m.s⁻¹]	2,56	2,54	2,51	2,49	2,47
SS: průměrná teplota [°C]	506,5	469,5	432,5	395,5	358,5
SS: hustota [kg.m⁻³]	827,4	836,9	846,2	855,1	864,0
SS: střední rychlost [m.s⁻¹]	3,96	3,91	3,87	3,83	3,79

7.1.2 Podobnostní čísla

Na začátek je podle vztahu (5.25) vypočten smáčený obvod pro primární proudění a následně ze vztahu (5.24) charakteristický rozměr, respektive ekvivalentní hydraulický průměr, rovněž pro primární proudění. Do výpočtu vstupují základní rozměry z tabulek 6.3 a 6.8 a průtočný průřez primárního sodíku.

$$O_p = \pi \cdot (D_1 + D_{CT2} + n_t \cdot d_2) = \pi \cdot (2,016 + 0,84 + 5688 \cdot 0,016) = 294,8 \text{ m}$$

$$d_{eP} = \frac{4 \cdot A_P}{O_P} = \frac{4 \cdot 1,49}{294,8} = 0,02 \text{ m}$$

Pro sekundární sodík platí vztah (5.26), tedy:

$$d_{eS} = d_1 = 0,0132 \text{ m}$$

Následně je určena kinematická viskozita a Prandtlovo číslo. Jako určující teplota je průměrná teplota daného úseku. V dalším kroku je vypočítáno Reynoldsovo číslo (ze vztahu 5.23) a Pecletovo číslo (ze vztahu 5.28) pro každý úsek primární i sekundární části. Ve vztahu pro Reynoldsovo číslo je použit ekvivalentní hydraulický průměr, střední rychlost proudění z tabulky 7.3 a kinematická viskozita.

$$Re_{P1} = \frac{v_{SP1} \cdot d_{eP1}}{\nu_{P1}} = \frac{2,56 \cdot 0,02}{0,279 \cdot 10^{-6}} = 186\,260,4$$

$$Re_{S5} = \frac{v_{SS5} \cdot d_{eS5}}{\nu_{S5}} = \frac{3,79 \cdot 0,0132}{0,349 \cdot 10^{-6}} = 143\,364,4$$

Pomocí Reynoldsova a Prandtlava čísla je dopočítáno Pecletovo číslo.

$$Pe_{P1} = Re_{P1} \cdot Pr_{P1} = 186260,4 \cdot 4,65 \cdot 10^{-3} = 865,59$$

$$Pe_{S5} = Re_{S5} \cdot Pr_{S5} = 143364,4 \cdot 5,38 \cdot 10^{-3} = 771,42$$

Výpočty jsou uvedeny pouze pro jeden úsek výměníku. Všechny úseky jsou dopočítány stejným způsobem.

Pecletovo číslo (Pe) se pohybuje v rozmezí 865,59 až 796,01 pro primární sodík. A podíl rozteče trubek (s_{\min}) ke vnějšímu průměru (d_2) je 1,313. Obě dvě hodnoty splňují následující kritéria:

$$80 < Pe < 4\,000$$

$$1,1 < \left(\frac{s_{\min}}{d_2}\right) < 1,5$$

Poté se může pro výpočet Nusseltova čísla v mezitrubkovém prostoru (na straně primárního sodíku) pro podélné obtékání trubek použít vztah (5.29). Před tím výpočet rozměru d_r podle vztahu (5.30).

$$d_r = d_2 \cdot \left[1,1 \cdot \left(\frac{s_{\min}}{d_2}\right)^2 - 1\right] = 0,016 \cdot \left[1,1 \cdot \left(\frac{0,021}{0,016}\right)^2 - 1\right] = 0,014 \text{ m}$$

Nusseltovo číslo pro první úsek primární části je:

$$Nu_{P1} = 0,58 \cdot \left(\frac{d_r}{d_2}\right)^{0,55} \cdot Pe^{0,45} = 0,58 \cdot \left(\frac{0,014}{0,016}\right)^{0,55} \cdot 865,59^{0,45} = 11,44$$

U sekundární látky (trubkový prostor) jsou kritéria:

$$10^4 < Re < 10^6$$

$$4 \cdot 10^{-3} < Pr < 3,2 \cdot 10^{-2}$$

$$\left(\frac{1}{d_1}\right) > 30$$

Protože Re se pohybuje v rozmezí 143364,4 až 182164,8, Pr v rozmezí $4,75 \cdot 10^{-3}$ až $5,38 \cdot 10^{-3}$ a poměr délky trubky k vnitřnímu průměru trubky je řádově vyšší než kritériální, může se pro výpočet Nusseltova čísla použít vztah (5.31).

$$Nu_{S5} = 4,5 + 0,014 \cdot Pe_{S5}^{0,8} = 4,5 + 0,014 \cdot 771,42^{0,8} = 7,36$$

Tabulka 7.4: Vypočítané hodnoty

	Počet úseků n				
	1	2	3	4	5
PS: ekvivalentní průměr [m]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
PS: viskozita $\times 10^6 [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	0,279	0,289	0,300	0,312	0,326
PS: Prandtlovo číslo $\times 10^3$	4,65	4,78	4,91	5,04	5,18
PS: Reynoldsovo číslo	186260,4	177935,6	169809,1	161659,3	153708,4
PS: Pecletovo číslo	865,59	849,80	833,15	815,24	796,01
PS: Nusseltovo číslo	11,447	11,353	11,252	11,143	11,024
SS: ekvivalentní průměr [m]	0,0132	0,0132	0,0132	0,0132	0,0132
SS: viskozita $\times 10^6 [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	0,287	0,300	0,316	0,332	0,349
SS: Prandtlovo číslo $\times 10^3$	4,75	4,91	5,08	5,24	5,38
SS: Reynoldsovo číslo	182164,8	171989,4	161796,8	152265,8	143364,4
SS: Pecletovo číslo	864,95	844,22	821,60	797,15	771,42
SS: Nusseltovo číslo	7,631	7,571	7,505	7,433	7,357

7.1.3 Součinitele a délka trubek

Pro další výpočet je určena u každého úseku tepelná vodivost λ , za určující teplotu je brána průměrná teplota v úseku. Pomocí vztahu (5.32) je vypočítán součinitel přestupu tepla α . Výpočet je uveden pro první úseky proudění primárního sodíku a pro první úsek proudění sekundárního sodíku.

$$\alpha_{P1} = \frac{Nu_{P1} \cdot \lambda_{SP1}}{d_{eP}} = \frac{11,447 \cdot 62,69}{0,02} = 35402,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

$$\alpha_{S5} = \frac{Nu_{S5} \cdot \lambda_{SS5}}{d_{eS}} = \frac{7,357 \cdot 71,3}{0,0132} = 39738,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

Podle vztahů (5.33) a (5.34) je vypočítán rozdíl teplot na konci úseku (výstup primárního sodíku a vstup sekundárního sodíku) a rozdíl teplot na začátku úseku (vstup primárního sodíku a výstup sekundárního sodíku),

$$\Delta t_{11} = t_{Po} - t_{Si} = 515 - 488 = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{21} = t_{Pi} - t_{So} = 545 - 525 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

po dosazení do vztahu (5.35) získáme logaritmický teplotní spád pro první úsek výměníku, obdobně se dopočítají zbylé úseky.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{11} - \Delta t_{21}}{\ln \frac{\Delta t_{11}}{\Delta t_{21}}} = \frac{27 - 20}{\ln \frac{27}{20}} = 23,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Pro výpočet prostupu tepla je vypočítán výpočtový průměr d ze vztahu (5.37)

$$d = \frac{d_2 + d_1}{2} = \frac{0,016 + 0,0132}{2} = 0,0146 \text{ m}$$

a z tabulky 6.2 vzata tepelná vodivost materiálu. Pak ze vztahu (5.36) vyjde:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{P1}} \cdot \frac{d}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{S1}} \cdot \frac{d}{d_2}} = \frac{1}{\frac{1}{35402,1} \cdot \frac{0,0146}{0,0132} + \frac{1}{2 \cdot 31,4} \ln \frac{0,016}{0,0132} + \frac{1}{36761,1} \cdot \frac{0,0146}{0,016}}$$

$$k = 9941,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

Tabulka 7.5: Vypočítané hodnoty

	Počet úseků n				
	1	2	3	4	5
PS: tepelná vodivost [W.m⁻¹.K⁻¹]	62,69	63,85	65,13	66,56	68,16
PS: součinitel přestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹]	35402,1	35762,1	36153,7	36588,2	37071,7
SS: tepelná vodivost [W.m⁻¹.K⁻¹]	63,59	65,15	66,94	69,00	71,30
SS: součinitel přestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹]	36761,1	37366,7	38060,9	38853,1	39738,6
Δt₁	27,0	34,0	41,0	48,0	55,0
Δt₂	20,0	27,0	34,0	41,0	48,0
Δt	23,33	30,37	37,40	44,41	51,42
Tepelná vodivost materiálu [W.m⁻¹.K⁻¹]	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4
Výpočtový průměr trubky [m]	0,0146	0,0146	0,0146	0,0146	0,0146
Součinitel prostupu tepla [W.m⁻².K⁻¹]	9941,7	10016,1	10098,6	10190,5	10291,1

Na závěr je ze vztahu (5.38) vypočtena výhřevná plocha

$$S_1 = \frac{Q_1}{\Delta t_1 \cdot k_1} = \frac{120\,000\,000}{23,33 \cdot 9941,7} = 517,48 \text{ m}^2$$

a ze vztahu (5.40) délky trubek jednotlivých úseků.

$$l_1 = \frac{S_1}{\pi \cdot d \cdot n_t} = \frac{517,48}{\pi \cdot 0,0146 \cdot 5688} = 1,98 \text{ m}$$

Výsledná střední délka trubek je sumou délek trubek jednotlivých úseků.

$$l'_{stř} = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = 1,984 + 1,512 + 1,218 + 1,016 + 0,869 = 6,60 \text{ m}$$

Tabulka 7.6: Vypočítané hodnoty

	Počet úseků n				
	1	2	3	4	5
Výhřevná plocha [m²]	517,48	394,55	317,80	265,17	226,77
Délka trubek v úseku [m]	1,984	1,512	1,218	1,016	0,869
Střední délka trubek [m]	6,600				

Po delší době práce výměníku dojde k zanesení trubek, a tím ke zhoršení prostupu tepla. S tímto stavem se musí počítat již při návrhu, a proto je navýšena teplosměnná plocha, respektive délka teplosměnných trubek. Na dostatečné vyvážení nánosů se uvažuje zvýšení teplosměnné plochy o 5%. V průběhu výpočtu je zanedbáno i sdílení tepla centrální trubicou. Toto teplo rovněž přispěje k vyvážení zhoršení přestupu tepla vlivem nánosů.

$$l_{stř} = 1,05 \cdot l'_{stř} = 1,05 \cdot 6,6 = 6,93 \text{ m} \quad (7.1)$$

Střední délka trubek je 7,00 m.

7.1.4 Další vypočítané rozměry

Pro lepší odhad průměru přívodových a odvodových trubek a rozměrů rozváděcího prstence jsou zde předběžně vypočteny tyto průměry. Vyjádřeny jsou ze vztahu pro průtočný průřez.

$$A = x \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} [\text{m}^2] \quad (7.2)$$

A - příslušný průtočný průřez [m^2]

d - příslušný průměr [m]

x - počet trubek [-]

Výpočet vnitřního průměru příváděcího a odváděcího potrubí pro primární sodík:

$$d'_{T1} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_P}{x \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,49}{2 \cdot \pi}} = 0,974 \text{ m} \quad (7.3)$$

Výpočet vnitřního průměru pro potrubí odvádějící sekundární sodík:

$$d'_{SG1} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_S}{x \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,78}{2 \cdot \pi}} = 0,705 \text{ m} \quad (7.4)$$

Skutečně volené hodnoty jsou shrnuty v kapitole 8.

7.2 Hydraulický výpočet

Výpočet tlakový ztrát je proveden jak pro primární proudění, tak pro sekundární. U sekundárního navíc zvlášť pro centrální trubku a pro teplosměnné trubky, protože v každém prostoru je jiné proudění a rozměry.

7.2.1 Tlaková ztráta třením

K výpočtu tlakové ztráty třením je potřeba znát rychlost proudění sodíku, hustotu sodíku a součinitele tlakové ztráty. V něm vystupuje absolutní drsnost povrchu a ekvivalentní průměr. Absolutní drsnost je brána 0,05 mm [1], tato hodnota platí pro nerezovou ocel. Ekvivalentní průměr je vypočítán v kapitole 7.1.2.

Pro primární sodík (mezitrubkový prostor) platí:

$$\lambda_P = \frac{1}{\left[1,74 + 2 \cdot \ln\left(\frac{d_{ep}}{2\Delta}\right)\right]^2} = \frac{1}{\left[1,74 + 2 \cdot \ln\left(\frac{0,02}{2 \cdot 0,00005}\right)\right]^2} = 0,00657$$

Pro další výpočet je použita průměrná střední rychlost proudícího sodíku. Průměr je vypočítán ze všech pěti úseků.

$$v_P = \frac{v_{P1} + v_{P2} + v_{P3} + v_{P4} + v_{P5}}{n} \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (7.5)$$

$$v_P = \frac{2,56 + 2,537 + 2,513 + 2,491 + 2,47}{5} = 2,514 \text{ m.s}^{-1}$$

Průměrná hustota sodíku:

$$\rho_P = \frac{\rho_{P1} + \rho_{P2} + \rho_{P3} + \rho_{P4} + \rho_{P5}}{n} \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (7.6)$$

$$\rho_P = \frac{821,8 + 829,0 + 836,8 + 844,4 + 851,6}{5} = 836,72 \text{ kg.m}^{-3}$$

Podle vztahu (5.42) je vypočítána tlaková ztráta vlivem tření v primární části výměníku. Délka trubek je 9,8 m (uvedeno v kapitole 8).

$$\Delta p_{tP} = \lambda_P \cdot \frac{l_{tr}}{d_{eP}} \cdot \frac{v_P^2 \cdot \rho_P}{2} = 0,00657 \cdot \frac{9,8}{0,02} \cdot \frac{2,514^2 \cdot 836,72}{2} = 8514,08 \text{ Pa}$$

Sekundární sodík (trubkový prostor) má dvě části teplosměnné trubky a centrální trubku.

Součinitel tlakové ztráty pro teplosměnné trubky

$$\lambda_{str} = \frac{1}{\left[1,74 + 2 \cdot \ln\left(\frac{d_{es}}{2\Delta}\right)\right]^2} = \frac{1}{\left[1,74 + 2 \cdot \ln\left(\frac{0,0132}{2 \cdot 0,00005}\right)\right]^2} = 0,00755$$

a součinitel tlakové ztráty pro centrální trubku.

$$\lambda_{SCT} = \frac{1}{\left[1,74 + 2 \cdot \ln\left(\frac{D_{CT1}}{2\Delta}\right)\right]^2} = \frac{1}{\left[1,74 + 2 \cdot \ln\left(\frac{0,81}{2 \cdot 0,00005}\right)\right]^2} = 0,00257$$

Dále je potřeba vypočítat střední rychlost proudění v centrální trubce, proto výpočet průtočného průřezu centrální trubky ze vztahu (5.15)

$$A_{SCT} = \frac{\pi \cdot D_{CT1}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,81^2}{4} = 0,515 \text{ m}^2$$

protože sodík v centrální trubce má podobné vlastnosti, jako sodík vstupující do prvního úseku sekundární části je ve výpočtu uvažována příslušná hustota a hmotnostní průtok.

$$v_{SCT} = \frac{\dot{m}_{S5}}{\rho_{S5} \cdot A_{SCT}} = \frac{2548,78}{863,96 \cdot 0,515} = 5,725 \text{ m.s}^{-1}$$

Výsledkem je tlaková ztráta vlivem tření pro sekundární proudění vypočtena z upraveného vztahu (5.42)

$$\Delta p_{ts} = \lambda_{str} \cdot \frac{l_{tr}}{d_{es}} \cdot \frac{v_s^2 \cdot \rho_s}{2} + \lambda_{sct} \cdot \frac{l_{ct}}{d_{ct1}} \cdot \frac{v_{sct}^2 \cdot \rho_{s5}}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (7.7)$$

$$\Delta p_{ts} = 0,00755 \cdot \frac{9,8}{0,0132} \cdot \frac{3,871^2 \cdot 845,92}{2} + 0,00257 \cdot \frac{10,68}{0,81} \cdot \frac{5,725^2 \cdot 863,96}{2}$$

$$\Delta p_{ts} = 36024,55 \text{ Pa}$$

kde vystupuje průměrná hustota a průměrná střední rychlost proudění v sekundární části

$$v_s = \frac{v_{s1} + v_{s2} + v_{s3} + v_{s4} + v_{s5}}{n} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7.8)$$

$$v_s = \frac{3,957 + 3,911 + 3,868 + 3,829 + 3,79}{5} = 3,871 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\rho_s = \frac{\rho_{s1} + \rho_{s2} + \rho_{s3} + \rho_{s4} + \rho_{s5}}{n} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (7.9)$$

$$\rho_s = \frac{827,44 + 836,93 + 846,2 + 855,08 + 863,96}{5} = 845,92 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

délka L je celá část centrální trubky, která prochází výměníkem.

7.2.2 Tlaková ztráta místními odpory

K výpočtu tlakové ztráty místními odpory jsou brány hodnoty místních odporů z tabulky 5.1. Do výpočtu vstupují i různé rychlosti a hustoty sodíku v daném místě ztráty, tyto výpočty jsou uvedeny níže.

Tlaková ztráta místními odpory pro primární sodík (mezitrubkový prostor) je vypočítána podle vztahu (5.45):

$$\Delta p_{mP} = \sum \xi_m \cdot \frac{v^2 \cdot \rho_P}{2} + \sum \xi_p \cdot \frac{v^2 \cdot \rho_P}{2} \quad [\text{Pa}]$$

$$\Delta p_{mP} = (\xi_{mMP1} \cdot v_{MP1}^2 \cdot \rho_{P1} + \xi_{mMP2} \cdot v_{MP2}^2 \cdot \rho_{P5} + \xi_{mRP1} \cdot v_{RP1}^2 \cdot \rho_{P1} + \xi_{mRP2} \cdot v_{RP2}^2 \cdot \rho_{P5} + \xi_p \cdot v_{P1}^2 \cdot \rho_{P1} + \xi_p \cdot v_{P5}^2 \cdot \rho_{P5}) \cdot \frac{1}{2}$$

$$\Delta p_{mP} = (1 \cdot 6,765^2 \cdot 821,8 + 0,5 \cdot 6,526^2 \cdot 851,6 + 1,5 \cdot 1,450^2 \cdot 821,8 + 1,5 \cdot 1,398^2 \cdot 851,6 + 12,5 \cdot 2,560^2 \cdot 821,8 + 12,5 \cdot 2,470^2 \cdot 851,6) \cdot \frac{1}{2} = 96540,62 \text{ Pa}$$

Výpočet rychlost proudění a průtočného průřezu v místě výstupu sodíku z příváděcího potrubí.

$$A_{MP1} = \frac{\pi \cdot d_{T1}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,6^2}{4} = 0,283 \text{ m}^2$$

$$v_{MP1} = \frac{\dot{m}_{P1}}{2 \cdot \rho_{P1} \cdot A_{MP1}} = \frac{3143,804}{2 \cdot 821,8 \cdot 0,283} = 6,765 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Průměr d_{T1} je uveden v tabulce 8.1. Hmotnostní průtok je dělen dvěma, protože příváděcí potrubí jsou dvojce.

Průtočný průřez v místě výstupu je roven průtočnému průřezu v místě vstupu. Po dosazení příslušných hodnot získáme rychlost proudění v místě výstupu sodíku do odváděcího potrubí.

$$A_{MP2} = A_{MP1} = 0,283 \text{ m}^2$$

$$v_{MP2} = \frac{\dot{m}_{P5}}{2 \cdot \rho_{P5} \cdot A_{MP2}} = \frac{3142,504}{2 \cdot 851,6 \cdot 0,283} = 6,526 \text{ m.s}^{-1}$$

Průtočný průřez a rychlost proudění pro sodík v místě vstupu v otvorech rozváděcího prstence. Otvory rozváděcího prstence jsou elipsy s osami 0,8 m a 0,3 m. Těchto otvorů je na polovině výměníku 7.

$$A_{RP1} = 7 \cdot \pi \cdot a \cdot b = 7 \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot 0,15 = 1,319 \text{ m}^2$$

$$v_{RP1} = \frac{\dot{m}_{P1}}{2 \cdot \rho_{P1} \cdot A_{RP1}} = \frac{3143,804}{2 \cdot 821,8 \cdot 1,319} = 1,450 \text{ m.s}^{-1}$$

Podobně pro výstup z trubkového svazku

$$A_{RP2} = A_{RP1} = 1,319 \text{ m}^2$$

$$v_{RP2} = \frac{\dot{m}_{P5}}{2 \cdot \rho_{P5} \cdot A_{RP2}} = \frac{3142,504}{2 \cdot 851,6 \cdot 1,319} = 1,398 \text{ m.s}^{-1}$$

U sekundárního proudění je výpočet ztráty místními odpory podobný.

$$\Delta p_{mS} = \sum \xi_m \cdot \frac{v^2 \cdot \rho_P}{2} \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{mS} = (\xi_{mCT} \cdot v_{CT}^2 \cdot \rho_{S5} + \xi_{mPT} \cdot v_{CT}^2 \cdot \rho_{S5} + \xi_{mTT1} \cdot v_{S5}^2 \cdot \rho_{S5} + \xi_{mTT2} \cdot v_{S1}^2 \cdot \rho_{S1} + \xi_{mSG} \cdot v_{S1}^2 \cdot \rho_{S1}) \cdot \frac{1}{2}$$

$$\Delta p_{mS} = (1 \cdot 5,725^2 \cdot 863,96 + 0,5 \cdot 5,725^2 \cdot 863,96 + 0,5 \cdot 3,79^2 \cdot 863,96 + 1 \cdot 3,957^2 \cdot 827,44 + 0,75 \cdot 7,843^2 \cdot 827,44) \cdot \frac{1}{2} = 49902,34 \text{ Pa}$$

Průtočný průřez a rychlost proudění pro sekundární sodík v místě výstupu z výměníku.

$$A_{SG} = \frac{\pi \cdot D_{SG1}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} = 0,196 \text{ m}^2$$

$$v_{SG} = \frac{\dot{m}_{S1}}{2 \cdot \rho_{S1} \cdot A_{SG}} = \frac{2548,35}{2 \cdot 827,44 \cdot 0,196} = 7,843 \text{ m.s}^{-1}$$

7.2.3 Hydrostatický tlak sodíku

V případě primárního sodíku je potřeba vypočítat i hydrostatický tlak způsobený výškou hladiny sodíku.

$$p_{hP} = \rho_P \cdot g \cdot h = 836,72 \cdot 9,81 \cdot 9,869 = 81006,95 \text{ Pa}$$

Výška h je výška hladiny primárního sodíku brána od dna nádoby po vrchní trubkovnici a hustota je uvažována průměrná hustota primárního sodíku vypočítána v kapitole 7.2.1.

7.2.4 Celková tlaková ztráta

Pro primární sodík

$$\Delta p_{zP} = \Delta p_{tP} + \Delta p_{mP} = 8514,08 + 96540,62 = 105054,7 \text{ Pa}$$

a pro sekundární sodík.

$$\Delta p_{zS} = \Delta p_{tS} + \Delta p_{mS} = 36024,55 + 49902,34 = 85926,89 \text{ Pa}$$

Při uvážení tlakové ztráty v primární části výměníku 0,105 MPa a jisté míry bezpečnosti, je v primární části volen výpočtový tlak 0,3 MPa. V sekundární části je tlaková ztráta 0,086 MPa, výsledný tlak by mohl být nižší než v primární části, ale vzhledem k eliminaci úniku radioaktivního sodíku do sekundárního okruhu je zde volen tlak 0,35 MPa.

7.3 Pevnostní výpočet

7.3.1 Válcová část

Pevnostní výpočet pro válcovou část nádoby. Podmínka pro použití vztahů:

$$\frac{s_N}{D_{N1}} = \frac{20}{2276} = 8,78 \cdot 10^{-3} \leq 0,1 \text{ pro } D_{N1} = 2276 \geq 200 \text{ mm}$$

podmínka vyhovuje.

Pro výpočet kontroly tloušťky stěny je uvažován tlak 0,381 MPa, tento tlak odpovídá pracovnímu tlaku navýšenému o hydrostatický tlak. Součinitel podélného svaru φ_p je roven 1 a dovolené napětí je 186 MPa.

$$s_{Nmin} = \frac{p \cdot D_{N1}}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} = \frac{381000 \cdot 2,276}{2 \cdot 186000000 - 381000} = 0,0023 \text{ m}$$

Navrhnutá tloušťka stěny nádoby 0,02 m je větší než minimální povolená 0,0023 m. Tloušťka stěny nádoby vyhovuje.

Výpočet dovoleného vnitřní přetlaku. Konstanta c , která vyjadřuje přídavek materiálu, je rovna nule.

$$p_{Nmax} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_N - c)}{D_{N1} + (s_N - c)} = \frac{2 \cdot 186000000 \cdot 1 \cdot (0,02 - 0)}{2,276 + (0,02 - 0)} = 3240418 \text{ Pa}$$

7.3.2 Eliptické dno

Na úvod výpočet výšky eliptického dna H (vztah 5.50)

$$H = 0,25 \cdot D_{N1} = 0,25 \cdot 2,276 = 0,569 \text{ m}$$

a poloměru křivosti (vztah 5.51).

$$R_{N1} = D_{N1} = 2,276 \text{ m}$$

Podmínky pro vztahy na výpočet eliptického dna

$$0,002 \leq \frac{0,02 - 0}{2,276} = 0,0088 \leq 0,1$$

$$0,2 \leq \frac{0,569}{2,276} = 0,25 \leq 0,5$$

podmínky vyhovují.

I přesto, že sekundární sodík, který má vyšší tlak, působí na víko nádoby a na dno nádoby působí primární sodík, je pevnostně kontrolováno dno, protože díky hydrostatickému tlaku je absolutní tlak na dno vyšší než na víko.

Výpočet minimální tloušťky stěny dna

$$s_{NDmin} = \frac{p \cdot R_{N1}}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - 0,5 \cdot p} = \frac{381000 \cdot 2,276}{2 \cdot 186000000 \cdot 1 - 0,5 \cdot 381000} = 0,0023 \text{ m}$$

i v tomto případě navrhnutá tloušťka stěny 0,02 m vyhovuje.

Dovolený vnitřní přetlak je:

$$p_{NDmax} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_N - c)}{R_{N1} + 0,5 \cdot (s_N - c)} = \frac{2 \cdot 186000000 \cdot 1 \cdot (0,02 - 0)}{2,276 + 0,5 \cdot (0,02 - 0)} = 3254593 \text{ Pa}$$

8 Shrnutí

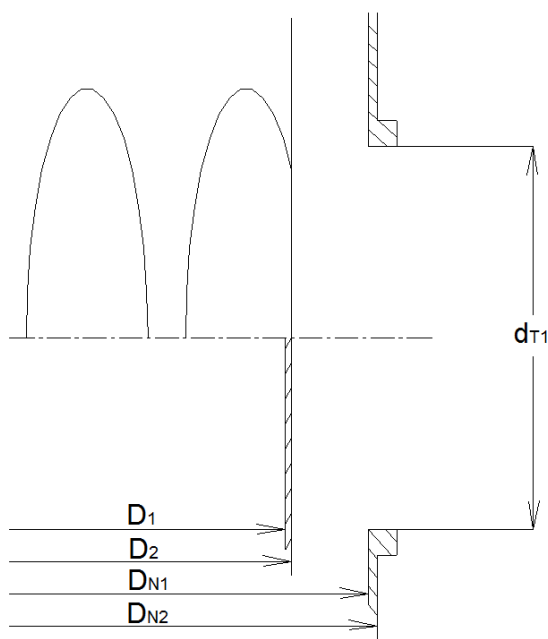
V následující kapitole jsou shrnuty zadané, volené a vypočítané parametry mezivýměníku.

Celkový tepelný výkon reaktoru ESFR 3600 MWt je v uvedeném výpočtu odváděn šesti smyčkami. Každý výměník má tedy tepelný výkon 600 MWt.

8.1 Primární sodík (PS) místo vstupu (1)

Před vstupem primárního sodíku do mezivýměníku je potrubí rozvětveno na dvě větve, každá vstupuje do výměníku z jedné strany. Po vstupu do nádoby výměníku je sodík rozváděn po obvodě prstencovým rozvaděčem. Prstencový rozvaděč je vysoký 1 m a má po obvodě 14 eliptických děr s osami 0,8 m a 0,3 m.

V každé větvi je hmotnostní průtok sodíku 1572 kg.s^{-1} , po zaplavení trubkového prostoru je hmotnostní průtok $3143,8 \text{ kg.s}^{-1}$, teplota sodíku je 545°C a rychlost proudícího sodíku $2,56 \text{ m.s}^{-1}$.



Obrázek 8.1: Vstup primárního sodíku do výměníku

Tabulka 8.1: Rozměry nádoby

Rozměr	Hodnota	Jednotka
D_1	2016	mm
D_2	2036	mm
D_{N1}	2276	mm
D_{N2}	2316	mm
d_{T1}	600	mm

8.2 Primární sodík místo výstupu (2)

Potrubí pro odvod primárního sodíku z výměníku a odváděcí prstenec mají stejné rozměry jako ve vstupní části. Na dvou stranách je výstupní potrubí, které se za výměníkem spojuje.

Teplota výstupního primárního sodíku je 395°C , jeho rychlost je $2,47 \text{ m.s}^{-1}$ a hmotnostní průtok před rozvětvením $3142,5 \text{ kg.s}^{-1}$.

8.3 Sekundární sodík (SS) místo vstupu (3)

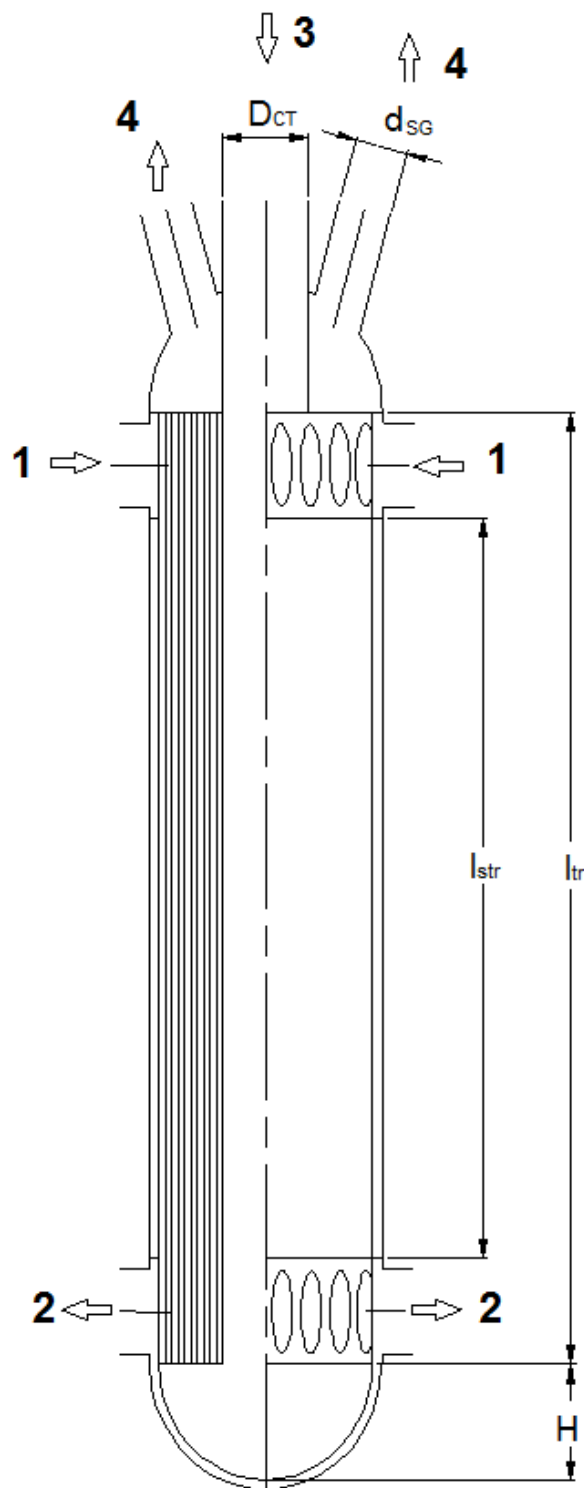
Potrubí pro sekundární sodík přivedené od parního generátoru je napojeno na centrální trubku, která vede do spodní plovoucí trubkovnice. Tvar plovoucí trubkovnice kopíruje eliptické dno nádoby. Trubky ústí do horní pevné trubkovnice.

Teplota na vstupu do trubkového svazku je 340°C , rychlost proudění $3,79 \text{ m.s}^{-1}$ a hmotnostní průtok $2548,78 \text{ kg.s}^{-1}$.

8.4 Sekundární sodík místo výstupu (4)

Pro výstup sekundárního sodíku jsou ve víku dva otvory o průměru 0,5 m. Rozvětvené potrubí je za výměníkem spojeno.

Sodík má na výstupu teplotu 525°C , rychlost proudění $3,95 \text{ m.s}^{-1}$ a hmotnostní průtok $2548,35 \text{ kg.s}^{-1}$.



Obrázek 8.2: Výměník

Tabulka 8.2: Rozměry nádoby

Rozměr	Hodnota	Jednotka
D_{CT1}	810	mm
D_{CT2}	840	mm
d_{SG1}	500	mm
l_{str}	7000	mm
l_{tr}	9800	mm
H	0,569	mm

Tabulka 8.3: Rozměry trubek

Rozměr	Hodnota	Jednotka
d_1	13,2	mm
d_2	16	mm
s_{min}	21	mm
n_t	5 688	

Tabulka 8.4: Teploty výměníku

Rozměr	Hodnota	Jednotka
t_1	545	$^{\circ}\text{C}$
t_2	395	$^{\circ}\text{C}$
t_3	340	$^{\circ}\text{C}$
t_4	525	$^{\circ}\text{C}$

8.5 Nádobá výměníku a trubkový svazek

Trubky jsou uspořádané v trojúhelníkovém uspořádání a vyplňují prostor mezi centrální trubkou a pláštěm výměníku. Tloušťka vrchní pevné trubkovnice je 0,5 m, tato trubkovnice přesahuje stěnu nádoby, protože na ní bude výměník zavěšen. K této trubkovnici je napevno přivařena centrální trubka, trubkový svazek, spodní trubkovnice, plášť trubkovnice a víko nádoby. Válcová část nádoby je svařena s eliptickým dnem a rozebíratelně připevněna k vrchní trubkovnici. Spodní plovoucí trubkovnice má výšku 0,3 m. Celková délka trubek 9,8 m je součtem střední délky trubek 7 m s dvěma výškami rozváděcího prstence 1 m a s tloušťkami trubkovnic 0,3 m a 0,5 m. Mezikruží mezi pláštěm výměníku a válcovou částí nádoby je vyplněno sodíkem o stejném tlaku jako primární. Po délce mezikruží jsou umístěny výztuhy. V nejspodnějším místě nádoby je odvodňovací otvor pro úplné vypuštění primárního sodíku. Otvor má průměr 0,2 m. Celková délka teplosměnných trubek výměníku je dána délkou trubek 9,8 m, dvěma výškami H (0,569 m) a dvěma tloušťkami nádoby 0,02 m. Celková výška nádoby je 10,978 m.

Tabulka 8.5: Tlaky výměníku

Rozměr	Hodnota	Jednotka
p_P	0,3	MPa
p_{hP}	0,081	MPa
p_S	0,35	MPa
Δp_{zP}	0,107	MPa
Δp_{zS}	0,085	MPa
p_{Nmax}	3,240	MPa
p_{NDmax}	3,255	MPa

8.6 Jaderná a technická bezpečnost

Bezpečnost zařízení se odvíjí od provozní spolehlivosti. Důležitá je i pravidelná kontrola a revize výměníku. Pro vyloučení úniku radioaktivního sodíku do neradioaktivního sekundárního sodíku je v sekundárním okruhu vyšší pracovní tlak. Tento tlak je neustále monitorován, aby případná netěsnost a tím snížení tlaku byla okamžitě zjištělná. Monitorován je rovněž i tlak v primárním okruhu. Kontinuálně je měřena radioaktivita v sodíku.

Největší nebezpečí poruchy je při nenominálních provozech (najíždění a odstávka) z důvodů tepelné roztažnosti materiálu, proto je potřeba výměník postupně prohřát. Tloušťky stěn nádoby a maximální dovolený vnitřní přetlak jsou dostatečně vyhovující. Materiál výměníku má i za pracovních teplot (přes 500°C) ideální pevnostní vlastnosti.

8.7 Porovnání s jinými RR

Následně jsou některé vypočítané rozměry porovnány s vybranými rychlými reaktory (tabulka 8.6). Výše navrhnutý výměník počtem teplosměnných trubek i jejich délkou převyšuje dosavadně provozované výměníky. Nejvíce podobné parametry mají ruské reaktory BN-600 a BN-800 a francouzský Superphénix.

Tabulka 8.6: Porovnání rychlých reaktorů s navrhnutým projektem [16]

Reaktor	Počet trubek	Délka trubek [mm]	Vnější průměr trubek [mm]	Vnější průměr nádoby [mm]
ESFR	5688	9020	16	2316
BR-10	85	1590	22	338
Fermi	1860	4660	22,2	1450
BOR-60	1158	3000	20	1200
BN-350	1029	7000	28	200x3000*
Phénix	2279	5300	14	1210
BN-600	4974	6360	16	2070
Super Phénix	5380	6540	14	1830
Monju	3200	-	21,7	3000
BN-800	4956	6455	16	2070
PFBR	1782	6980	24	1548

*-obdelníkový průřez

9 Závěr

Rychlé reaktory mají v mnoha ohledech lepší vlastnosti než termální. Například malé tlaky v okruzích, intenzivnější vývin tepla, menší rozměry pro stejný výkon, nebo možnost množení štěpitelného materiálu. Díky tomu se stavěly již od počátku využívání jaderné energie. Mezi chladivy se nejvíce prosadil sodík, díky jeho dobrým vlastnostem (vysoká teplota varu, malá korozivnost atd.). Od počátečních staveb se převážně projektovalo smyčkové uspořádání. V dnešní době se přechází více na integrální uspořádání. Z nových projektů, kterými se zabývá mezinárodní fórum GIF, má právě sodíkem chlazený projekt ESFR nejvíce provozních zkušeností a největší pravděpodobnost prvního prototypu.

Konstrukce mezivýměníků jsou neustále zdokonalovány. Ale už od prvních projektů se nejčastěji stavěly typy, kde je výměník vertikálně postaven a sekundární sodík proudí trubkovým prostorem ze spodní části do horní. Primární sodík v opačném směru v mezitrubkovém prostoru. Jednoduché trubky, protože mají lepší přestup tepla a jsou levnější. Parametry a rozměry se značně lišily, podle tepelného výkonu výměníku a způsobu využití elektrárny (experimentální, komerční).

Konkrétní výpočet je proveden pro základní parametry ujednané na konferenci FISA 2009. Výpočet spočíval v odhadnutí počtu trubek a následném dopočítání teplosměnné plochy. Jsou navrhnuty základní rozměry trubkového svazku a výměníkové nádoby. U výměníku jsou odhadnuty tlakové ztráty a ověřena pevnostní bezpečnost tloušťky stěny a dovoleného tlaku. Výsledky jsou shrnuty v kapitole 8. I přesto, že v rozsahu výpočtu jsou zavedeny některé předpoklady a zanedbány některé vlivy, může být návrh výměníku věrohodný a sloužit k přesnější představě o konstrukci, rozměrech a funkci mezivýměníku.

10 Seznam použité literatury

- [1] MATAL, Oldřich a Hugo ŠEN. *Jaderná zařízení a jejich bezpečnost*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4349-5.
- [2] BEČVÁŘ, Josef a KOLEKTIV. *Jaderné elektrárny*. 2. opravené vydání. Praha: SNTL/ALFA, 1981.
- [3] DUBŠEK, František. *Jaderná energetika*. 2. vydání, doplněné. Brno: PC-DIR, 1997. ISBN 80-214-0833-2.
- [4] DUBŠEK, František. *Jaderné reaktory*. Brno: PC-DIR, 1995. ISBN 80-214-0715-8.
- [5] BORIŠANSKIJ, V. M., aj. *Židkometaličeskije teplonositely*. Moskva: Atomizdat, 1956.
- [6] SAZIMA, Miroslav, Vladimír KMONÍČEK a Jiří SCHNELLER. *Teplo*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00043-2.
- [7] ŠORIN, S. N. *Sdílení tepla*. Praha: SNTL/ALFA, 1968.
- [8] MIKULA, Julius a KOL. *Potrubí a armatury*. 2. vydání, přepracované. Praha: SNTL, 1974.
- [9] OCHRANA, Ladislav. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2847-3.
- [10] MATAL, Oldřich. *Konstrukční cvičení: Vybrané komponenty jaderné energetických zařízení*. Brno: Editační středisko VUT Brno, 1988
- [11] ČSN 69 6810. *Spojování trubek s trubkovnicemi výměníků tepla*. Praha: ČNI, 1989.
- [12] ČSN 69 0010. *Tlakové nádoby stabilní. Technická pravidla*. Praha: ČNI, 1991.
- [13] ČSN 42 0251. *Trubky ocelové bezešvé se zaručenými vlastnostmi za vyšších teplot. Technické dodací předpisy*. Praha: ČNI, 1990
- [14] *FISA 2009: 7th European Commission Conference on Euratom research and training in reactor systems* [online]. Praha, 2009 [cit. 2012-05-22]. ISBN 13-978-92-79-13302-2. Dostupné z: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/euratom-fission/docs/fisa2009-conference-proceedings_en.pdf



- [15] EURATOM. *Nuclear science and technology: Road Map for a European Innovative Sodium-cooled Fast Reactor* [online]. 2009 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp6-euratom/docs/eisofar-final-report_en.pdf
- [16] IAEA. *Fast reactor database*. Vídeň, 1996.
- [17] IAEA. *PRIS* [online]. 2012 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://pris.iaea.org/Public/home.aspx>
- [18] IAEA. *International Atomic Energy Agency* [online]. 2012 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/index.html>
- [19] IAEA. *Nuclear Power Reactors in the World* [online]. 2011 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS2_web.pdf
- [20] IAEA. *Operating experience 2010* [online]. 2011 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/OPEX_2010_CD_web/Start.pdf
- [21] IAEA. *Liquid Metal Cooled Reactors: Experience in Design and Operation* [online]. Vídeň, 2007 [cit. 2012-05-22]. ISBN 978-92-0-107907-7. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1569_web.pdf.
- [22] CARRÉ, Frank. *Next Generation Nuclear Reactors*. 2010. Dostupné z: http://www.jaif.or.jp/ja/wnu_si_intro/document/2010/carre-next_generation_nuclear_reactors_si2010.pdf
- [23] Periodická tabulka chemických prvků. *Periodická tabulka prvků* [online]. 2009 [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/periodicka-tabulka.html>.

11 Seznam použitých zkratk

Zkratka	Jednotka	Popis
a	kJ.kg^{-1}	práce
a	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	teplotní vodivost
a	m	hlavní poloosa elipsy
A	m^2	průtočný průřez
A_{MP1}	m^2	průtočný průřez v hrdle příváděcí trubky primárního sodíku
A_{MP2}	m^2	průtočný průřez v hrdle odváděcí trubky primárního sodíku
A_{P}	m^2	průtočný průřez pro primární sodík ve výměníku
A_{RP1}	m^2	průtočný průřez v otvorech rozváděcího prstence
A_{RP2}	m^2	průtočný průřez v otvorech odváděcího prstence
A_{S}	m^2	průtočný průřez pro sekundární sodík ve výměníku
A_{SCT}	m^2	průtočný průřez pro sekundární sodík v centrální trubce
A_{SG}	m^2	průtočný průřez v hrdle trubky výstupu sekundárního sodíku
b	m	vedlejší poloosa elipsy
BN		bystrýj natrievyj (rychlý sodíkový)
BOR		bystrýj opytynj reactor (rychlý experimentální reaktor)
BR		bystrýj reactor (rychlý reaktor)
c	m	přídavky materiálu na stěně nádoby
c_p	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita
C		uhlík (chemický prvek)
CEA		komise pro atomovou energii a alternativní zdroje energie
CO_2		oxid uhličitý
Cr		chrom (chemický prvek)
Cu		měď (chemický prvek)
d	m	charakteristický rozměr pro proudění
d	m	výpočtový průměr trubky
d_e	m	ekvivalentní (hydraulický) průměr
d_{eP}	m	ekvivalentní (hydraulický) průměr pro primární sodík
d_{eS}	m	ekvivalentní (hydraulický) průměr pro sekundární sodík
d_{SG1}	m	vnitřní průměr v hrdle trubky odvádějící sekundární sodík
d_{T1}	m	vnitřní průměr v hrdle příváděcí a odváděcí trubky primárního sodíku
d_1	m	vnitřní průměr teplosměnné trubky
d_2	m	vnější průměr teplosměnné trubky
d'_2	m	průměr díry v trubkovnici
D_{CT1}	m	vnitřní průměr centrální trubky
D_{CT2}	m	vnější průměr centrální trubky
D_{ni}	m	průměr i-té kružnice
D_{N1}	m	vnitřní průměr nádoby
D_{N2}	m	vnější průměr nádoby
D_1	m	vnitřní průměr pláště trubkovnice



Zkratka	Jednotka	Popis
D_2	m	vnější průměr pláště trubkovnice
EFFBR		Enrico Fermi fast breeder reactor (rychlý množivý reaktor Enrico Fermi)
ESFR		European sodium-cooled fast reactor (sodíkem chlazený rychlý evropský reaktor)
EU		Evropská unie
Fe		železo (chemický prvek)
g	$m.s^{-2}$	gravitační zrychlení
GFR		gas-cooled fast reactor (plynem chlazený rychlý reaktor)
GIF		generation IV international forum (mezinárodní fórum pro IV. generaci reaktorů)
h	m	výška hladiny kapaliny
H	m	výška eliptického dna nádoby
i	$kJ.kg^{-1}$	entalpie
i_i	$kJ.kg^{-1}$	entalpie na vstupu
i_o	$kJ.kg^{-1}$	entalpie na výstupu
IHX		intermediate heat exchanger (mezivýměník tepla)
k	$W.m^{-2}.K^{-1}$	součinitel prostupu tepla
k_{pred}	$W.m^{-2}.K^{-1}$	předběžný součinitel prostupu tepla
l_{pred}	m	předběžná délka teplosměnných trubek
l_{str}	m	střední délka teplosměnných trubek
l_{tr}	m	celková délka teplosměnných trubek
L	m	délka centrální trubky výměníku
LFR		lead-cooled fast reactor (olovem chlazený rychlý reaktor)
LMFBR		liquid metal fast breeder reactor (rychlý množivý reaktor chlazený tekutým kovem)
\dot{m}	$kg.s^{-1}$	hmotnostní průtok
\dot{m}_p	$kg.s^{-1}$	hmotnostní průtok primárního sodíku
\dot{m}_s	$kg.s^{-1}$	hmotnostní průtok sekundárního sodíku
Mn		mangan (chemický prvek)
Mo		molybden (chemický prvek)
MSR		molten salt reactor (reaktor chlazený tavenými solemi)
MW_e		megawatty elektrické
MW_t		megawatty tepelné
n	-	počet úseků výměníku
n_r	-	počet řad teplosměnných trubek
n_t	-	počet teplosměnných trubek
n_{ti}	-	počet teplosměnných trubek na i-té řadě
n_{tpred}	-	předběžný odhad počtu teplosměnných trubek
Na		sodík (chemický prvek)
Ni		nikl (chemický prvek)
Nu	-	Nusseltovo číslo
O	m	smočený obvod průtočného průřezu
O_p	m	smočený obvod průtočného průřezu primárního sodíku

Zkratka	Jednotka	Popis
p	Pa	pracovní tlak
p _h	Pa	hydrostatický tlak
p _{hP}	Pa	hydrostatický tlak pro primární sodík
p _{Nmax}	Pa	dovolený vnitřní přetlak pro válcovou část nádoby
p _{NDmax}	Pa	dovolený vnitřní přetlak pro eliptické dno nádoby
p _P	Pa	tlak v primárním okruhu
p _S	Pa	tlak v sekundárním okruhu
Pe	-	Pecletovo číslo
PFBR		prototyp fast breeder reactor
PO		primární okruh
PS		primární sodík
Pr	-	Prandtlovo číslo
Pu		plutonium (chemický prvek)
Pu239		239. izotop plutonia
q	kJ.kg^{-1}	teplo
Q	kW	výkon
Re	-	Reynoldsovo číslo
R _m	MPa	mez pevnosti v tahu
R _{N1}	m	poloměr křivosti eliptického dna nádoby
R _{p0,2}	MPa	mez kluzu v tahu
s _{min}	m	minimální rozteč teplosměnných trubek
s' _{min}	m	minimální vypočtená rozteč teplosměnných trubek
s _N	m	tloušťka stěny válcové části nádoby
s _{Nmin}	m	minimální tloušťka stěny válcové části nádoby
s _{ND}	m	tloušťka stěny dna nádoby
s _{NDmin}	m	minimální tloušťka stěny dna nádoby
s _t	m	tloušťka teplosměnné trubky
S	m ²	výhřevná plocha
SCWR		super critical water reactor (reaktor chlazený vodou se superkritickými parametry)
SFR		sodium-cooled fast reactor (sodíkem chlazený rychlý reaktor)
Si		křemík (chemický prvek)
SO		sekundární okruh
SS		sekundární sodík
t _i	°C	teplota na vstupu
t _o	°C	teplota na výstupu
t _{prum}	°C	průměrná teplota
t _{Pi}	°C	teplota primárního sodíku na vstupu
t _{Po}	°C	teplota primárního sodíku na výstupu
t _{Si}	°C	teplota sekundárního sodíku na vstupu
t _{So}	°C	teplota sekundárního sodíku na výstupu
t ₁	°C	teplota primárního sodíku na vstupu do výměníku
t ₂	°C	teplota primárního sodíku na výstupu z výměníku



Zkratka	Jednotka	Popis
t_3	°C	teplota sekundárního sodíku na vstupu do výměníku
t_4	°C	teplota sekundárního sodíku na výstupu z výměníku
Ti		titan (chemický prvek)
U		uran (chemický prvek)
U238		238. izotop uranu
v	m.s^{-1}	rychlost proudění chladicího média
v_{MP1}	m.s^{-1}	střední rychlost proudění v hrdle příváděcí trubky
v_{MP2}	m.s^{-1}	střední rychlost proudění v hrdle odváděcí trubky
v_P	m.s^{-1}	střední rychlost proudění primárního sodíku ve výměníku
v_{RP1}	m.s^{-1}	střední rychlost proudění v otvorech rozváděcího prstence
v_{RP2}	m.s^{-1}	střední rychlost proudění v otvorech odváděcího prstence
v_s	m.s^{-1}	střední rychlost proudění
v_S	m.s^{-1}	střední rychlost proudění sekundárního sodíku ve výměníku
v_{SCT}	m.s^{-1}	střední rychlost proudění sekundárního sodíku v centrální trubce
v_{SG}	m.s^{-1}	střední rychlost proudění v hrdle výstupní trubky sekundárního sodíku
VHTR		very high temperature reactor (reaktor s velmi vysokou teplotou)
w	m.s^{-1}	rychlost proudění
WANO		the world association of nuclear operators (světové sdružení provozovatelů jaderných elektráren)
x	-	počet trubek (přívodových, odvodových)
α	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla
α_{Ppred}	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	předběžný součinitel přestupu tepla pro primární sodík
α_{Spred}	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	předběžný součinitel přestupu tepla pro sekundární sodík
α_1	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla pro médium uvnitř trubky
α_2	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla pro médium vně trubky
Δ	m	absolutní drsnost
Δp_m	Pa	tlaková ztráta místními odpory
Δp_{mP}	Pa	tlaková ztráta místními odpory pro primární sodík
Δp_{mS}	Pa	tlaková ztráta místními odpory pro sekundární sodík
Δp_t	Pa	tlaková ztráta třením
Δp_{tP}	Pa	tlaková ztráta třením pro primární sodík
Δp_{tS}	Pa	tlaková ztráta třením pro sekundární sodík
Δp_z	Pa	tlaková ztráta
Δp_{zP}	Pa	tlaková ztráta primárního sodíku
Δp_{zS}	Pa	tlaková ztráta sekundárního sodíku
Δt	°C	logaritmický teplotní spád
Δt_{pred}	°C	předběžný logaritmický teplotní spád
ϕ_p	-	součinitel hodnoty podélného svaru
λ	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
λ	-	součinitel tlakové ztráty
λ_m	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	tepelná vodivost materiálu trubky

Zkratka	Jednotka	Popis
λ_P	-	součinitel tlakové ztráty pro primární sodík
λ_s	$W.m^{-1}.K^{-1}$	tepelná vodivost sodíku
λ_{Str}	-	součinitel tlakové ztráty pro sekundární sodík v teplosměnných trubkách
λ_{SCT}	-	součinitel tlakové ztráty pro sekundární sodík v centrální trubce
ν	$m^2.s^{-1}$	kinematická viskozita
ρ	$kg.m^{-3}$	hustota
ρ_P	$kg.m^{-3}$	průměrná hustota primárního sodíku
ρ_s	$kg.m^{-3}$	průměrná hustota sekundárního sodíku
σ	MPa	dovolené namáhání
ξ_m	-	součinitel místních odporů
ξ_{mCT}	-	ztráta při výstupu z centrální trubky
ξ_{mMP1}	-	ztráta při vstupu do mezitrubkového prostoru
ξ_{mMP2}	-	ztráta při výstupu z mezitrubkového prostoru
ξ_{mPT}	-	ztráta ve spodní plovoucí trubkovnici
ξ_{mRP}	-	ztráta při průchodu rozváděcím prstencem
ξ_{mSG}	-	ztráta při výstupu z víka výměníku
ξ_{mTT1}	-	ztráta při vstupu do teplosměnných trubek
ξ_{mTT2}	-	ztráta při výstupu z teplosměnných trubek
ξ_p	-	ztrátový součinitel příčně obtékaného trubkového svazku



12 Seznam příloh

- [1] Výkres sestavy výměníku